



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 AUTONOMÍA DE LA BATERÍA DE UN
VEHÍCULO URBANO ELÉCTRICO”**

AUTORES: PAILLACHO PROAÑO ERICK JAVIER

TEQUIS IBUJÉS ALBERTO XAVIER

DIRECTOR: ING. RAMIRO ROSERO, MSc.

Ibarra, Marzo 2022

CERTIFICADO

ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

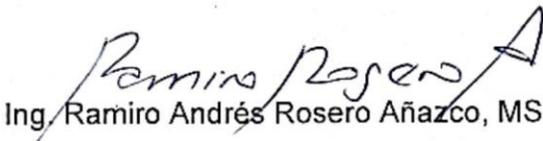
En mi calidad de director del plan de trabajo de grado, previo a la obtención del título de Ingeniería en Mantenimiento Automotriz, nombrado por el Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas.

CERTIFICO:

Que una vez analizado el plan de grado cuyo título es "ANÁLISIS DE LA AUTONOMÍA DE LA BATERÍA DE UN VEHÍCULO URBANO ELÉCTRICO" presentado por el señor: Paillacho Proaño Erick Javier con número de cédula 1750313569 y el señor: Tequis Ibjés Alberto Xavier con número de cédula 1003107503, 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 10 días del mes de marzo del 2022.

Atentamente


Ing. Ramiro Andrés Rosero Añazco, MSc
DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO



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:	1750313569		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Paillacho Proaño Erick Javier		
DIRECCIÓN:	Ibarra, avenida 17 de Julio y Los Tulipanes		
EMAIL:	ejpaillachop@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	022 387 482	TELÉFONO MÓVIL:	098 795 3781

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1003107503		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Tequis Ibujés Alberto Xavier		
DIRECCIÓN:	Ibarra, calle 10 de Agosto y Agustín Rosales		
EMAIL:	axtequisi@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	062 974 193	TELÉFONO MÓVIL:	098 082 1615

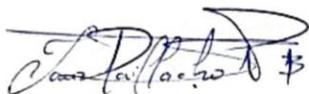
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"Análisis de la autonomía de la batería de un vehículo urbano eléctrico"
AUTORES:	Paillacho Proaño Erick Javier, Tequis Ibujés Alberto Xavier
FECHA:	14/03/2022
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Mantenimiento Automotriz
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Ramiro Rosero, MSc.

2. CONSTANCIAS

Los autores manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de 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 14 días del mes de marzo de 2022

LOS AUTORES:



Paillacho Proaño Erick Javier



Tequis Ibijés Alberto Xavier

DEDICATORIA

Este trabajo de grado es dedicado en primer lugar a mis padres, Fernando y Alba, quienes me han brindado su amor incondicional desde el primer instante de mi vida.

A mi abuelita Yolanda por acompañarme más que nunca en esta etapa universitaria y quien, a través de sus acciones ha posibilitado la consecución de mi formación académica.

A mis queridas hermanas Ivette y Amadis por ser mis compañeras de aprendizaje, mi motivación y mi ejemplo a seguir.

JAVIER PAILLACHO

A Dios, por guiarme siempre por el mejor camino.

A mi madre Martha Ibujés por su ejemplo de perseverancia y valentía ante toda situación en la vida.

A mi hermano Marco Tequis, por ser una persona ejemplar y su apoyo incondicional durante todo el transcurso de mis estudios.

A mis familiares y amigos, gracias por guiarme, brindar sus consejos, extender su mano cuando más lo necesité y en especial por hacer real esta gran etapa de mi vida como profesional.

XAVIER TEQUIS

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por concederme una familia amorosa y otorgarme todas mis capacidades prestas a su servicio.

A mis padres, abuelita y hermanas por sus incontables actos de apoyo, comprensión y felicidad.

A la Universidad Técnica del Norte por haber sido la puerta hacia los conocimientos de esta gallarda carrera por medio de sus salones, laboratorios e ilustres docentes.

Al ingeniero Ramiro Rosero, director de esta tesis, quien ha sabido orientar nuestros esfuerzos con paciencia, sabiduría y criterio.

JAVIER PAILLACHO

A mi madre Martha Ibujés, por su ayuda, paciencia y eterno afecto, agradezco infinitamente sus consejos y su mano incondicional para salir siempre adelante.

Al Ing. Ramiro Rosero, director de tesis, por sus conocimientos y sentido de compromiso con los que ha orientado este trabajo para su adecuada realización.

A la Universidad Técnica del Norte por el apoyo otorgado para la realización de mis estudios.

XAVIER TEQUIS

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii
INTRODUCCIÓN	xviii
CAPÍTULO I	1
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Situación Actual	3
1.3 Prospectiva	4
1.4 Planteamiento del Problema	5
1.5 Objetivos	5
1.5.1 Objetivo General	5
1.5.2 Objetivos Específicos	6
1.6 Alcance	6
1.7 Justificación	7
1.8 Contexto	8
CAPÍTULO II	10
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 Transporte y Movilidad	10
2.1.1 Modos de transporte	10
2.1.2 Medios de transporte	10
2.1.3 El concepto de movilidad urbana	10
2.1.4 Patrones de movilidad en la urbe	11
2.1.4.1 Metodologías para el análisis de la movilidad urbana	11
2.1.5 Movilidad eléctrica	12
2.2 Vehículos Eléctricos	13
2.2.1 Definición del vehículo eléctrico	13
2.2.2 Tren de potencia	13
2.2.2.1 Inversor	13
2.2.2.2 Engranaje reductor	14
2.2.2.3 Motor eléctrico	14
2.2.2.4 Convertidor de bajo voltaje	14
2.2.2.5 Sistema de frenado regenerativo	14
2.2.3 Sistemas de almacenamiento de energía	15
2.2.3.1 Parámetros característicos de las baterías	15
2.2.3.2 Evaluación de estado de carga (SOC)	17
2.2.3.3 Evaluación de estado de salud (SOH)	18
2.2.3.4 Tipos de baterías	19
2.2.4 Recarga del vehículo eléctrico	21
2.2.4.1 Niveles de carga	22
2.2.4.2 Tipos de conectores	22
2.2.4.3 Modos de carga	23
2.2.5 Autonomía del vehículo eléctrico	24
2.3 Ciclos de Conducción	24
2.3.1 Ciclos de conducción en el mundo	25

2.3.1.1 Ciclos de conducción en la Unión Europea	25
2.3.1.2 Ciclos de conducción en Estados Unidos	27
2.3.1.3 Ciclos de conducción en Japón	29
2.3.1.4 Ciclos de conducción desarrollados en Ecuador	30
2.3.2 Métodos para el desarrollo de los ciclos de conducción	31
2.3.2.1 Técnicas de obtención de datos e instrumentación	31
2.3.3 Métodos para la selección de rutas	31
CAPÍTULO III	33
3. MATERIALES Y MÉTODOS	33
3.1 Metodología	33
3.2 Estudio de los patrones de movilidad	34
3.2.1 Definición del área de estudio	34
3.2.1.1 Cantón Ibarra	34
3.2.1.2 Zonificación del territorio urbano del cantón Ibarra	34
3.2.2 Método de 4 etapas	34
3.2.2.1 Etapa 1. Generación y atracción de viajes	35
3.2.2.2 Etapa 2. Distribución de viajes	37
3.2.2.3 Etapa 3. Partición modal	38
3.2.2.4 Etapa 4. Asignación de rutas	38
3.3 Determinación de la ruta de ensayo	39
3.3.1 Reglamento UE 2017/1151	39
3.4 Selección del vehículo e instrumentación	40
3.4.1 Renault Twizy	40
3.4.2 Instrumentación	41
3.4.2.1 Instrumentación para la obtención del ciclo de conducción	41
3.4.2.2 Instrumentación para obtener información sobre la autonomía	42
3.5 Levantamiento de datos en ruta	43
3.5.1 Consideraciones para las pruebas experimentales	43
3.5.2 Configuración e instalación de los equipos	43
3.5.2.1 Datalogger GPS GL-770	43
3.5.2.2 Scanner Launch X-431 PRO3	45
3.6 Procesamiento de la información y conformación del ciclo de conducción	48
3.6.1 Procesamiento de los registros del datalogger GPS	48
3.6.2 Procesamiento de los registros del scanner Launch	49
3.6.3 Conformación del ciclo de conducción	49
3.6.3.1 Parámetros del ciclo de conducción	50
3.6.3.2 Estados de conducción	52
3.7 Análisis de la autonomía del vehículo eléctrico	53
3.7.1 Definición de parámetros	53
3.7.1.1 Estimación del estado de carga en función del voltaje (SOC _v)	54
3.7.1.2 Estimación del estado de carga en función de la corriente de descarga (SOC _i)	54
3.7.1.3 Autonomía disponible	55
3.7.1.4 Consumo	56
3.8 Definición de los parámetros que influyen en la autonomía	56
3.8.1 Identificación de parámetros	56

3.8.1.1	Parámetros de conducción	56
3.8.1.2	Parámetros geográficos	57
3.8.1.3	Parámetros ambientales	59
3.8.1.4	Parámetros vehiculares	59
3.8.2	Evaluación de la influencia de los parámetros en la autonomía	60
3.8.2.1	Resistencia aerodinámica	61
3.8.2.2	Resistencia por rodadura	62
3.8.2.3	Resistencia por pendiente	63
3.8.2.4	Potencia	64
3.8.2.5	Consumo	65
3.8.2.6	Autonomía	66
CAPÍTULO IV		67
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		67
4.1	Definición de la metodología para el análisis de la autonomía	67
4.2	Estudio de los patrones de movilidad	68
4.2.1	Definición del área de estudio	68
4.2.1.1	Cantón Ibarra	68
4.2.1.2	Zonificación del territorio urbano de Ibarra	69
4.2.2	Método de 4 etapas	75
4.2.2.1	Etapla 1. Generación y atracción de viajes	75
4.2.2.2	Etapla 2. Distribución de viajes	78
4.2.2.3	Etapla 3. Partición modal	81
4.2.2.4	Etapla 4. Asignación de rutas	82
4.3	Determinación de la ruta de ensayo	91
4.3.1	Ruta urbana de ensayo	91
4.3.2	Ruta rural de ensayo	93
4.3.3	Ruta de autopista	95
4.3.4	Ruta final de ensayo	97
4.4	Conformación de los ciclos de conducción	99
4.4.1	Ciclo de conducción urbano	99
4.4.2	Ciclo de conducción rural	100
4.4.3	Ciclo de conducción de autopista	101
4.4.4	Ciclo de conducción combinado	103
4.5	Análisis de la autonomía	105
4.5.1	Análisis de autonomía en ruta urbana	105
4.5.1.1	Altitud	105
4.5.1.2	Velocidad	106
4.5.1.3	Régimen del motor eléctrico	107
4.5.1.4	Estado de carga basado en el voltaje (SOCv)	107
4.5.2	Análisis de autonomía en ruta rural	108
4.5.2.1	Altitud	108
4.5.2.2	Velocidad	109
4.5.2.3	Tensión de batería de tracción	110
4.5.2.4	Estado de carga basado en el voltaje (SOCv)	110
4.5.3	Análisis de autonomía en ruta de autopista y final	111

4.5.3.1 Altitud	111
4.5.3.2 Velocidad	112
4.5.3.3 Distancia recorrida	113
4.5.3.4 Estado de carga basado en el voltaje (SOCv)	114
4.5.4 Análisis en conjunto de los parámetros con la autonomía	114
4.5.5 Comparación de la autonomía y consumo establecidos por el fabricante	116
4.6 Definición de los parámetros que influyen en la autonomía	118
4.6.1 Evaluación de la influencia de los parámetros en la autonomía	118
4.6.1.1 Resistencia aerodinámica	118
4.6.1.2 Resistencia por rodadura	120
4.6.1.3 Resistencia por pendiente	121
4.6.1.4 Potencia motor	124
4.6.1.5 Consumo	126
4.6.1.6 Autonomía	127
CAPÍTULO V	130
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	130
5.1 Conclusiones	130
5.2 Recomendaciones	133
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134
ANEXOS	145

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA NÚM.	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
2.1	Metodología de cuatro fases esquematizada	11
2.2	Ciclo de conducción NEDC	25
2.3	Ciclo de conducción WLTP	27
2.4	Ciclo de conducción EPA FTP-75	28
2.5	Ciclo de conducción FTP-72	28
2.6	Ciclo de conducción EPA HWFET	29
2.7	Ciclo de conducción JC08	29
2.8	Ciclo de conducción para ciudad del D.M.Q.	30
3.1	Proceso metodológico para análisis de autonomía del vehículo urbano eléctrico	33
3.2	Elementos de una matriz origen destino	37
3.3	Renault Twizy Cargo	41
3.4	Datalogger GPS GL-770	41
3.5	Scanner Automotriz Launch X-431 PRO 3	42
3.6	Opciones de configuración del software TSI LogView	44
3.7	Instalación del datalogger GPS en el vehículo Renault	45
3.8	Lectura de componentes seleccionados mediante la aplicación X 431 PRO	48
3.9	Registros del módulo GPS ordenados en filas y columnas	48
3.10	Procesamiento de los datos obtenidos con el scanner automotriz	49
3.11	Ángulo de la pendiente (α), variación de altura (h), longitud (b) y distancia del recorrido (c)	57
4.1	Metodología definida para el análisis de la autonomía de un EV	67
4.2	División política del cantón Ibarra	69
4.3	Zonificación del área urbana del cantón Ibarra	71
4.4	Matriz origen-destino de la ciudad de Ibarra	80
4.5	Viajes realizados en función del medio de transporte empleado	82
4.6	Ruta urbana 1 con recorridos (a) N-S y (b) S-N	87
4.7	Ruta urbana 2 con recorridos (a) O-E y (b) E-O	88
4.8	Ruta urbana 3 con recorridos (a) N-S y (b) S-N	89
4.9	Ruta urbana 4 con recorridos (a) O-E	90
4.10	Ruta urbana 4 con recorridos (b) E-O	91
4.11	Perfil de elevación de la ruta urbana de ensayo	92
4.12	Ruta urbana de ensayo	93
4.13	Ruta rural de ensayo	94
4.14	Perfil de elevación de la ruta rural	95
4.15	Ruta de autopista	96
4.16	Perfil de elevación de la ruta de autopista	97
4.17	Ruta final de ensayo	98
4.18	Ciclo de conducción urbano	99
4.19	Ciclo de conducción rural	100
4.20	Ciclo de conducción de autopista	102
4.21	Ciclo de conducción combinado	104
4.22	Altitud vs. autonomía en un tramo del recorrido urbano	105

4.23	Velocidad vs. autonomía en un tramo del recorrido urbano	106
4.24	Régimen del motor vs. autonomía en un tramo del recorrido urbano	107
4.25	SOCv vs. autonomía en un tramo del recorrido urbano	108
4.26	Altitud vs. autonomía en un tramo del recorrido rural	108
4.27	Velocidad vs. autonomía en un tramo del recorrido rural	109
4.28	Tensión batería de tracción vs. autonomía en un tramo del recorrido rural	110
4.29	SOCv vs. autonomía en un tramo del recorrido rural	111
4.30	Altitud vs. autonomía en un tramo del recorrido de autopista y final	111
4.31	Velocidad vs. autonomía en un tramo del recorrido de autopista y final	112
4.32	Distancia vs. autonomía en un tramo del recorrido de autopista y final	113
4.33	SOCv vs. autonomía en un tramo del recorrido de autopista y final	114
4.34	Análisis de varios parámetros en un tramo del recorrido	115
4.35	Resistencia aerodinámica del EV en función de la velocidad	119
4.36	Tramo de ruta de autopista seleccionado para el análisis	121
4.37	Perfil de elevación del tramo seleccionado para el análisis	122
4.38	Potencia del motor en función de la velocidad con el paquete de baterías de fábrica y los utilizados por Tesla	125
4.39	Consumo en función de la velocidad con el paquete de baterías de fábrica y los módulos de baterías de Tesla	126
4.40	Autonomía en función de la velocidad con el paquete de baterías de fábrica y los módulos de baterías utilizados por Tesla	128

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA NÚM.	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
2.1	Medios de transporte según modos de transporte	10
2.2	Parámetros de la batería de Níquel – Hidruro metálico	20
2.3	Parámetros de la batería de ion de litio	20
2.4	Parámetros de la batería de polímero de litio	21
2.5	Niveles de carga	22
2.6	Tipos de conectores para vehículos eléctricos	23
2.7	Modos de carga del EV	24
2.8	Parámetros de los ciclos de conducción ECE-15, EUDC y NEDC	26
2.9	Parámetros del ciclo de conducción WLTP	26
2.10	Parámetros del ciclo de conducción para ciudad del D.M.Q.	30
2.11	Condiciones para el desarrollo de ensayos de conducción real (RDE)	32
3.1	Requisitos del trayecto según el Reglamento UE 2017/1151 para ensayos RDE	40
3.2	Parámetros, unidades y formato de registro del GPS GL-770	44
3.3	Componentes de los módulos electrónicos del Renault Twizy	46
3.4	Componentes seleccionados para la medición con el scanner	47
3.5	Especificaciones técnicas del EV	60
3.6	Especificaciones del módulo de baterías del Tesla Model S	63
4.1	Parroquias y barrios del cantón Ibarra	70
4.2	Identificación de las zonas delimitadas del área urbana	72
4.3	Proyección poblacional cantón Ibarra 2021	75
4.4	Número de viajes generados y atraídos por cada zona	77
4.5	Frecuencia de viajes realizados	78
4.6	Matriz origen-destino de la ciudad de Ibarra	79
4.7	Viajes realizados por medio de transporte	81
4.8	Rutas con mayor número de viajes conforme a Matriz OD de Ibarra	83
4.9	Viajes generados por cada zona	84
4.10	Viajes atraídos por cada zona	85
4.11	Caracterización de las rutas urbanas diseñadas	86
4.12	Características de la ruta urbana 1	87
4.13	Características de la ruta urbana 2	88
4.14	Característica de la ruta urbana 3	89
4.15	Características de la ruta urbana 4	90
4.16	Características de la ruta urbana de ensayo	92
4.17	Características de la ruta rural de ensayo	95
4.18	Matriz Origen – Destino cantonal para usuarios de autobús	96
4.19	Detalles de la ruta de carretera	97
4.20	Característica de la ruta final de ensayo	98
4.21	Parámetros del ciclo de conducción urbano	100
4.22	Parámetros del ciclo de conducción rural	101
4.23	Parámetros del ciclo de conducción de autopista	102

4.24	Parámetros del ciclo de conducción combinado	103
4.25	Valores de autonomía y consumo obtenidos en el estudio según el tipo de ruta	117
4.26	Comparativa de la autonomía y consumo establecidos por el fabricante con lo obtenido en el estudio	117
4.27	Pendiente de curva de resistencia aerodinámica según los intervalos de velocidad	120
4.28	Resistencia por rodadura con los diferentes paquetes de baterías	121
4.29	Características del tramo de ruta de autopista seleccionado para el análisis	122
4.30	Resistencia por pendiente del EV con los diferentes paquetes de baterías	124
4.31	Pendiente de curva de potencia motor según los intervalos de velocidad	126
4.32	Pendiente de curva de consumo según los intervalos de velocidad	127
4.33	Autonomía máxima y mínima para las dos condiciones de estudio	128
4.34	Pendiente de curva de autonomía según los intervalos de velocidad	129

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN NÚM.	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
2.1	Estado de carga	16
2.2	Estado de salud	17
2.3	Reacción química de la batería de Níquel-Hidruro metálico	19
3.1	Generación y atracción de viajes	35
3.2	Muestra	36
3.3	Distribución de viajes	38
3.4	Partición modal	38
3.5	Aceleración	50
3.6	Estado de permanencia en aceleración	52
3.7	Estado de permanencia en desaceleración	52
3.8	Estado de permanencia en parado	53
3.9	Estado de permanencia en cruce	53
3.10	Estimación del estado de carga en función del voltaje (SOC _v)	54
3.11	Estimación del estado de carga en función de la corriente de descarga (SOC _i)	55
3.12	Autonomía disponible	55
3.13	Consumo	56
3.14	Pendiente de la ruta	58
3.15	Cálculo de longitud	58
3.16	Resistencia aerodinámica	61
3.17	Cálculo de densidad del aire	61
3.18	Resistencia por rodadura	62
3.19	Resistencia por pendiente	64
3.20	Potencia para vencer resistencia aerodinámica	64
3.21	Potencia para vencer resistencia por rodadura	64
3.22	Potencia para vencer resistencia por pendiente	65
3.23	Potencia del motor para vencer fuerzas de resistencia	65
3.24	Consumo de energía	65
3.25	Autonomía	66

RESUMEN

El presente trabajo hace referencia al “Análisis de la autonomía de la batería de un vehículo urbano eléctrico” y tiene como finalidad estudiar la influencia de diversos parámetros en el rango de autonomía que puede llegar a tener un EV; a través de ensayos de conducción real en rutas establecidas dentro de la ciudad de Ibarra. En un principio se realizó el estudio de los patrones de movilidad de la parte urbana del cantón, a fin de identificar las rutas con mayor número de viajes, lo cual permitió la determinación de 4 rutas que conformaron la ruta urbana de ensayo. Las rutas de ensayo rural y de autopista no requirieron de un estudio de los patrones de movilidad puesto que las zonas y vías están bien definidas y se tiene un bajo número de viajes, considerándose únicamente los requisitos sobre el trayecto establecidos en el Reglamento UE 2017/1151 para ensayos RDE. Las pruebas de descarga del EV fueron realizadas sobre la ruta de ensayo utilizándose un módulo GPS y un scanner automotriz para el registro de parámetros cinemáticos y de funcionamiento. Una vez discretizada la información sobre la cinemática del automóvil se trazaron los ciclos de conducción, caracterizándolos en función de los estados de conducción y otros indicadores. La información del funcionamiento del EV en conjunto con la cinemática fue contrastada con la autonomía por medio de gráficas, permitiendo analizar la correlación e identificar variaciones. Además, se discutió la diferencia entre los valores de autonomía y consumo establecidos por el fabricante del vehículo y los obtenidos en este estudio, encontrándose que existe una disminución del 26,65% en la autonomía y un aumento del 32,02% en el consumo, respecto a lo especificado por el fabricante; siendo la principal causa de esto los diferentes métodos de evaluación. Finalmente, a través del estudio de la dinámica vehicular se determinó que la velocidad de circulación es el parámetro que más influye en el consumo de energía, mostrándose un aumento del 11,93% en este, cuando se incrementa la velocidad en un 8%, estableciéndose a su vez, que el máximo consumo se produce cuando se circula a la máxima velocidad. Por otra parte, una batería con una mejor energía específica y densidad de energía provoca que la autonomía aumente entre un 79,97% a un 85,48%, dependiendo de la velocidad a la que se circule.

ABSTRACT

This paper refers to the "Analysis of the range of an urban electric vehicle" and aims to study the influence of various parameters on the range that an EV can have, through real driving tests on established routes within the city of Ibarra. Initially, a study of the mobility patterns of the urban part of the city was carried out to identify the routes with the highest number of trips, which allowed the determination of 4 routes that together formed the urban test route. The rural and highway test routes did not require a study of mobility patterns since the zones and ways are properly defined and have a low number of trips, considering only the requirements on the route established in the UE 2017/1151 Regulation. The experimental EV discharge tests were performed on the test route using a GPS module and an automotive scanner to record kinematic and operating parameters. Once the information on the kinematics of the car was discretized, the driving cycles of each of the routes were plotted and characterized in terms of driving states and other indicators. The EV performance data and kinematic information were contrasted with the range through graphs, which allowed to analyze the correlation and identify variations. In addition, the difference between the values of range and consumption established by the vehicle manufacturer and those obtained in this study were discussed, finding that there is a decrease of 26,65% in range and an increase of 32,02% in consumption compared to the manufacturer's specifications; the main cause of this being the different evaluation methods. Finally, through the study of vehicle dynamics it was determined that the speed of circulation is the parameter that most influences energy consumption, showing an increase of 11,93% in this, when the speed is increased 8%, also establishing that the maximum consumption is produced when driving at maximum speed. On the other hand, a battery with a better specific energy and energy density causes the range to increase between 79.97% and 85.48%, depending on the speed at which the vehicle is driven.

INTRODUCCIÓN

El propósito de la presente investigación es analizar el rango de autonomía de las baterías de un vehículo puramente eléctrico, para mediante pruebas experimentales en rutas y ciclos de conducción, estudiar el comportamiento de los parámetros cinemáticos y funcionales del EV; además de establecer un valor de autonomía y consumo energético basado en las condiciones geográficas y de circulación de la ciudad de Ibarra.

De acuerdo con investigaciones previas sobre la aplicación de este tipo de vehículos como taxis y el estudio de la autonomía en condiciones reales en otras provincias del país, se ha puesto en evidencia el bajo impacto de la movilidad eléctrica a nivel nacional, producto no sólo del coste de los vehículos, sino también por el bajo rendimiento de las baterías bajo condiciones de conducción real. Bajo esta premisa, el presente estudio busca contribuir con conocimiento científico acerca de la autonomía de vehículos eléctricos considerando las variables que la supeditan.

En el primer capítulo se describe el problema de investigación después de haber repasado el avance histórico de los coches eléctricos y el estado del arte. Posteriormente se plantea el objetivo central del estudio, el alcance del proyecto y su justificación en base a las políticas de Estado. En el capítulo dos se realiza un estudio bibliográfico sobre el transporte y la movilidad, la caracterización de los vehículos eléctricos y lo relacionado a ciclos de conducción en el mundo, así como también, los métodos más utilizados para su desarrollo.

En el tercer capítulo se presenta el estudio de patrones de movilidad con en el método de 4 etapas y los lineamientos del trayecto establecidos en el Reglamento UE 2017/1151 referente a ensayos de conducción real (RDE). Asimismo, se detalla la instrumentación empleada en el estudio y el proceso de análisis de datos para definir lo relacionado al ciclo de conducción y la manera en que se analizó la autonomía. En cuanto al cuarto capítulo, se determinan las rutas de ensayo, los ciclos de conducción y el consecuente análisis de la autonomía mediante el estudio de determinados parámetros, estableciendo su grado de influencia.

Finalmente, en el quinto capítulo se hace una síntesis de lo alcanzado en el estudio, exponiéndose de manera concisa las conclusiones y recomendaciones del trabajo de investigación sobre análisis de autonomía de la batería del vehículo urbano eléctrico en la ciudad Ibarra.

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La contaminación ambiental se ha convertido en un problema fundamental de esta época porque supone el comprometimiento de los recursos naturales del futuro, así como también, el continuo deterioro del estado de la salud de la población. En este sentido, el panorama mundial se está enfocando en cambiar la matriz energética y buscar alternativas en los sectores que producen más contaminación, como es el caso del sector del transporte que apunta hacia el desarrollo y uso de vehículos eléctricos, ya que estos no producen emisiones durante la etapa de uso, tal como indica el análisis de su ciclo de vida (Xiong et al., 2020, pág. 3).

Los vehículos eléctricos no son un invento reciente, los componentes fundamentales tales como las baterías han sido desarrolladas desde 1859 de la mano de Gastón Planté (Martínez-Lao et al., 2017, pág. 1), mientras que se podría mencionar como primer vehículo eléctrico al construido por Charles Jeanteaud en el año 1881 (Chau & Wong, 2002, pág. 1953).

Tras el paso de unos cuantos años a partir de la creación del primer automóvil eléctrico se empiezan a diseñar varios prototipos que, debido a sus prestaciones, hace que se eleve la popularidad por este tipo de vehículos al punto de que en 1891 países como Inglaterra, Francia y Estados Unidos los adoptan para el servicio de taxis (C. C. Chan, 2007, pág. 706). Sin embargo, las limitaciones fundamentales relacionadas con la autonomía, tecnología de las baterías y tiempo de carga harían que los fabricantes dejen de lado este tipo de vehículos durante décadas posteriores (Mi & Masrur, 2017, pág. 2).

Durante el siglo XX, el motor de combustión interna ha sido objeto de continuo desarrollo, ajustándose a las condiciones del medio, principalmente aquellas relacionadas con las normativas ambientales (Sovacool, 2017, pág. 78). Por otro lado, en materia de vehículos eléctricos y su desarrollo, en el mismo período de tiempo se han tenido escasos modelos y

su uso ha ido variando continuamente desde camiones de carga hasta vehículos livianos, los cuales en su mayoría corresponderían a prototipos.

De esta manera, en 1974 surge el primer coche eléctrico producido en serie por parte de la empresa Sebring–Vanguard, diseñado para el tráfico urbano y de pequeñas dimensiones. Desde este acontecimiento varias marcas más conocidas como Renault, Peugeot, Citroën y General Motors lanzarían sus modelos, con un nivel bajo de aceptación por parte de los consumidores (H. Chan & Sutanto, 2000, pág. 470). Además, de que los mismos fabricantes se encontraban con los problemas relacionados por la tecnología en baterías y, por ende, autonomía.

Con la llegada del nuevo milenio, los grandes fabricantes automotrices continúan enfocándose completamente al mercado de los vehículos con motores de combustión interna y solo ciertos fabricantes lanzarían modelos eléctricos. Por otro lado, surgen nuevas compañías enfocadas netamente a la producción de automóviles eléctricos como es el caso de la compañía Tesla, la cual con el objetivo de atraer a los posibles clientes a través de la deportividad y el diseño, lanza en el 2005 el Tesla Roadster, siendo el primer deportivo eléctrico de la historia (Quiroga Persivale, 2016, pág. 5) .

A partir del año 2010, algunas compañías empiezan a comercializar modelos de vehículos eléctricos como es el caso de Mitsubishi a través del i/MiEV, el cual es el primer automóvil eléctrico de la historia en vender más de 10 000 unidades, siendo superado unos meses después por el Nissan Leaf (Nikowitz, 2016, pág 6).

Este éxito en ventas motivó a otros fabricantes de automóviles a producir sus propios vehículos eléctricos entre los que se destacan el Ford Focus eléctrico, Smart electric drive, Volvo C30, Renault Twizy, entre otros (Nikowitz, 2016, pág 6).

Sin embargo, la compañía que mayor potencial ha sacado de los vehículos eléctricos es Tesla. Desde su creación se han producido cinco modelos de automóviles ampliamente aceptados por la sociedad, convirtiéndose en un referente por la tecnología que han desarrollado e implementado en sus vehículos (Vynakov et al., 2016, pág 9). Por otro lado, Tesla ha motivado la creación de varias empresas alrededor del mundo dedicadas netamente a la producción de coches eléctricos, quienes en conjunto buscan resolver las limitaciones

de rango, infraestructura y de conciencia pública para permitir la accesibilidad de estos a la población.

Inicialmente, los costos de las baterías eran altos, sin embargo, a través del uso de diferentes materiales y los avances tecnológicos en los procesos, los costos han disminuido. Además, debido a la tecnología que estas incorporan, se ha logrado obtener un mayor rango de autonomía en los vehículos eléctricos (Ranawat & Prasad, 2018, pág. 1539).

Por lo antes expuesto, se toma en cuenta que la introducción del EV en el parque automotriz mundial y local es cada vez mayor, siendo de gran importancia el estudio, bajo condiciones reales, de la autonomía, la cual hace referencia a la cantidad de kilómetros que podrá desplazarse el vehículo, sin necesidad de recargar las baterías.

1.2 SITUACIÓN ACTUAL

De acuerdo con la federación ecologista europea Transport & Environment, actualmente, la fabricación de los vehículos eléctricos es una política industrial moderna además de una ley climática, viéndose reflejado en el acelerado aumento de las ventas de este tipo de automotores. Un claro ejemplo es la Unión Europea en donde se alcanzó en el 2020 un 10% más de lo previsto. Por otro lado, en España, durante el mismo año, el grupo PSA produjo en sus fábricas el 100% del EV y la expectativa para este 2021 es alcanzar un 15% más de lo previsto en ventas (Keynes, 2021).

En Ecuador, en junio del 2019 se aprobó la reducción al 0% del arancel de importación de vehículos eléctrico con Resolución Oficial No. 016-2019, conformándose como una iniciativa para minimizar el impacto ambiental y facilitar el acceso a nuevos medios de transporte que permitan la movilidad sustentable (Ministerio de Producción Comercio Exterior Inversiones y Pesca, 2019). Sin embargo, el nivel de acogida de los autos eléctricos ha sido muy bajo por parte de la población, evidenciándose en que la gran mayoría del parque automotor nacional son propulsados por un motor de combustión interna (MCI).

De igual manera, a nivel nacional existen insuficientes estudios sobre la autonomía de baterías de un vehículo eléctrico, siendo de especial interés, la inexistencia de estos trabajos de investigación a nivel de la provincia de Imbabura. Entonces se concluye que la propulsión

eléctrica cuenta con la iniciativa del Gobierno Nacional por su ventaja ambiental y energética, pero que a nivel provincial y cantonal se carece de información asentada a las condiciones locales que permitan dinamizar este tipo de movilidad.

1.3 PROSPECTIVA

La fabricación de un EV tiene como ventaja un ahorro de recursos del 30% sobre lo que se gasta en la fabricación de un vehículo con motor de combustión interna, el gran inconveniente es la tecnología y número de baterías, puesto que en esta se basa la autonomía, así como también, actualmente se indica una vida útil aproximada de 300000 km u 8 años, pero la expectativa con las nuevas investigaciones y fabricantes como Panasonic y CATL (proveedores de Tesla), indican que la duración de baterías sobrepasarán el doble a la indicada en los próximos diez años, pronosticando que se comercializarán baterías que durarán alrededor de un millón de kilómetros o 16 años aproximadamente, que es más de lo que se espera durará el vehículo (Rus, 2020). Además, los otros fabricantes se van adhiriendo a la tendencia electro ecológica, GM lanzará para el 2023, varios modelos de vehículos eléctricos dejando de lado la producción de vehículos híbridos. Además, China será el mercado más relevante que venderá EV en los próximos 10 años.

Por otra parte, en el caso de Ecuador, tomando en cuenta la matriz energética propuesta por el Estado para el aprovechamiento de las energías alternativas, las accesibles tarifas eléctricas, la propuesta de creación de electrolíneas, y las facilidades arancelarias para el importe de EV, se espera una mayor acogida de estos. Por esta razón, es importante la consecución de estudios basados en vehículos que ya se encuentran en el parque automotor local, investigación que dará una perspectiva a futuro de la aplicación de estas tecnologías en nuestro país. Entonces, con el presente estudio se desea determinar que, en la zona actual, las condiciones de movilidad a nivel de cantón se presten para el uso de vehículos eléctricos y que, mediante el análisis de la autonomía de las baterías, basado en los ciclos de conducción se contribuya al conocimiento científico local en materia de movilidad eléctrica.

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La problemática en el medio actual es la poca existencia de estudios relevantes sobre el nivel de autonomía de baterías del EV bajo condiciones reales, ya que el fabricante indica la autonomía homologada como dato referencial, pero dependiendo de la situación geográfica, los períodos de conducción, las condiciones de manejo y demás situaciones del medio, la autonomía difiere en gran medida según lo homologado.

Por otro lado, se tiene que tanto para los EV, como para los híbridos existe poca aceptación para su uso a nivel nacional, debido principalmente a la inexistencia de una adecuada infraestructura, insuficientes trabajos de investigación y al desconocimiento por parte de la ciudadanía sobre la alternativa eléctrica para el transporte.

Tanto a nivel mundial como local, el uso de vehículos con motor de combustión interna que incorporan nuevas tecnologías en el sistema de inyección y post tratamiento de gases de escape es tomado como una opción viable a pesar de la inevitable desventaja ecológica por la refinación de los combustibles fósiles. La contraparte ante esta situación la presenta el Estado que promueve el uso de EV, lo cual hace que el uso de estos vaya lentamente aplicándose en el país, a pesar de las políticas a favor, reducciones arancelarias para la importación y convenientes tarifas eléctricas.

En este sentido, como problemas actuales se encuentra la baja cantidad de estudios a nivel nacional y provincial sobre la autonomía del paquete de baterías que incorpora un vehículo eléctrico que resuelvan las limitaciones presentes en el medio local a través del conocimiento científico y que promuevan la movilidad eléctrica. Así como también, la gran discrepancia existente entre la autonomía homologada de los vehículos eléctricos y la obtenida bajo condiciones reales de manejo, siendo un factor de discusión y estudio a nivel mundial.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la autonomía de un vehículo urbano eléctrico mediante pruebas experimentales desarrolladas en rutas de ensayo y ciclos de conducción.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Establecer una metodología para el análisis de la autonomía del EV, basada en ciclos de conducción e información obtenida de pruebas experimentales, a fin de comparar la autonomía teórica con la real.
2. Determinar una ruta de ensayo para la ejecución de pruebas experimentales basada en los patrones de movilidad de la ciudad de Ibarra y lo establecido en el Reglamento UE 2017/1151.
3. Desarrollar los ciclos de conducción conforme a la información cinemática obtenida en los ensayos de conducción mediante un módulo GPS.
4. Establecer los parámetros que determinan la autonomía del EV mediante el análisis de la cinemática y dinámica vehicular.

1.6 ALCANCE

El presente trabajo de grado consiste en el estudio del rango de autonomía que presenta un vehículo eléctrico debido al empaquetado de baterías que este posee, con el fin de identificar la influencia de ciertos factores que hacen que la autonomía varíe mediante pruebas de ruta basadas en ciclos de conducción. En cuanto a rutas urbanas se refiere, serán objeto de estudio aquellas vías que se encuentren dentro de las parroquias urbanas de la ciudad de Ibarra, las cuales son: El Sagrario, San Francisco, Caranqui, Alpachaca y La Dolorosa de Priorato. Mientras que para el desarrollo de rutas rurales se analizarán las condiciones de vía de las parroquias: Ambuquí, Angochagua, Carolina, La Esperanza, Lita, Salinas, San Antonio. Finalmente, para la ruta de autopista serán objeto de estudio las vías primarias o carreteras que atraviesen la ciudad.

Para la consecución del trabajo, en un principio, será necesario recolectar información relacionada con los patrones de movilidad urbana y los centros de atracción de viaje de la ciudad de Ibarra, a través de un estudio de movilidad. De esta manera, se identificarán y analizarán las rutas que frecuenta la ciudadanía y el flujo de viajes de cada una de ellas.

Una vez definidas las rutas de ensayo, se procederá a realizar las correspondientes pruebas de campo con el vehículo urbano eléctrico, mediante el uso de un datalogger GPS encargado

de registrar información geográfica y cinemática durante un período de tiempo. Así como también, se utilizará un scanner automotriz que funcione como interfaz para la lectura y registro de los parámetros de funcionamiento del automotor, a través del protocolo OBD II.

De esta manera, se obtendrán datos referentes a la geografía de la ruta, ciclos de conducción y a los parámetros de funcionamiento del vehículo, siendo estos la base para el estudio de la autonomía. Por otra parte, tras la prueba de ruta se determinará el valor de la autonomía obtenida bajo condiciones reales de manejo para una posterior comparación con el valor establecido en la homologación del vehículo, a fin de comprobar si existe una variación entre estos. Finalmente, por medio del análisis de la dinámica vehicular se identificarán los parámetros de mayor influencia en el consumo y por ende, en la autonomía del EV.

1.7 JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de grado sobre el análisis de la autonomía de la batería de un vehículo urbano eléctrico busca determinar la autonomía real y los principales factores que intervienen directamente sobre la cantidad de rango de autonomía de un EV, mediante pruebas de ruta y ciclos de conducción.

En este sentido, el motivo de la investigación surge debido a la escasa cantidad de estudios sobre autonomía de vehículos eléctricos en regiones de altura, como es el caso de nuestro país y específicamente en el cantón Ibarra perteneciente a la provincia de Imbabura. Por esta razón, se considera importante la realización y publicación de estos trabajos de investigación, a fin de que aporten al desarrollo tecnológico local, al incremento de vehículos eléctricos en el parque automotriz nacional y al acercamiento por parte de la ciudadanía hacia las nuevas tecnologías del sector automotriz.

Por otro lado, el presente trabajo se encuentra en concordancia con el Plan Nacional para el Buen Vivir 2017-2021, respecto al Objetivo 3 sobre “Garantizar los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones” (SENPLADES, 2017, pág 55) y al Objetivo 5 acerca de “Impulsar la Productividad y Competitividad para el Crecimiento Económico Sustentable de Manera Redistributiva y Solidaria” (SENPLADES, 2017, pág 72), ya que sus políticas corresponden a los fines adyacentes del proyecto, mediante el aporte

de conocimiento científico para la futura implementación de vehículos eléctricos a nivel nacional, los cuales no producen emisiones contaminantes a lo largo de su período de uso.

Finalmente, cabe recalcar la contribución del estudio hacia el cambio de la matriz energética que se ha venido desarrollando en el país en el transcurso de los últimos años, en la cual se plantea la obtención de energía a partir de fuentes renovables, así como también, la elección del tipo de energía para el consumo local en base al menor grado de impacto ambiental y a la eficiencia energética. Por lo antes expuesto, la consecución del trabajo de grado aportará con conocimiento científico relacionado con la autonomía de los vehículos eléctricos en el medio, lo cual permitirá una mejora dentro del sector del transporte (mayor consumidor de recursos fósiles del país) y, por ende, al cambio de la matriz energética de la nación.

1.8 CONTEXTO

La baja autonomía de las baterías de un EV se indica por primera vez al intentar cambiar la movilidad de combustión por la movilidad eléctrica, al tomarse en cuenta que se requieren largos trayectos de recorrido y menores tiempos de carga de energía. Entonces, el problema se origina porque en un vehículo eléctrico desde sus principios y hasta la actualidad, la autonomía es inferior a la de un vehículo con MCI. Por este motivo, a pesar de las numerosas ventajas ecológicas que presentan los EV, los vehículos a combustión son los preferidos por superar este aspecto (Parapi & Pesantez, 2020, pág. 1)

El elemento principal al cual se rige la autonomía del EV es la batería, la cual está en constante desarrollo debido a las investigaciones sobre aplicaciones de nuevos compuestos como níquel, manganeso, cobalto, grafeno, entre otros. Tal como se puede ver reflejado en la investigación desarrollada sobre prolongación de autonomía de baterías con base de grafeno en la fabricación de estas, estableciendo una comparativa con las baterías ya fabricadas y las ventajas que brinda el grafeno sobre los materiales convencionales (Padilla-Padilla et al., 2018, pág. 310)

Cabe destacar, que la inserción de la movilidad eléctrica surge como alternativa en los años setenta a nivel mundial, época en la que se acentuaron los controles de emisiones y el alza

del precio del petróleo, sin embargo, aparece la particularidad de la baja autonomía ligada a dicha movilidad.

Es importante tomar en cuenta que las ventas de vehículos en Ecuador en el año 2019 fueron de 132 208 entre vehículos con motor de combustión interna, híbridos y eléctricos, de los cuales 4 291 pertenecieron a Imbabura. Por otro lado, se pone en manifiesto que, en el parque automotor nacional, los vehículos eléctricos en los últimos tres años bordean una media de 110 vehículos vendidos anualmente (AEADE, 2020, pág. 115)

A nivel nacional se destacan algunos estudios sobre autonomía del EV, y de las expectativas por mejorarla, siendo un claro ejemplo el estudio acerca de la autonomía y capacidad de baterías de taxis eléctricos para determinar su viabilidad como unidad de servicio público en la ciudad de Cuenca (Méndez Torres et al., 2020, pág. 20).

De igual manera, un estudio presentado por parte de la Universidad Católica de Cuenca sobre el incremento de la autonomía de batería en un 30% aproximadamente mediante la adaptación paneles solares (Reinoso & Ortega, 2020), así como también, una publicación sobre la implementación de paneles solares en un EV para generación eléctrica de aprovechamiento en accesorios del vehículo y con ello de manera indirecta aumentar la autonomía de la batería en un 10% aproximadamente (Parapi & Pesantez, 2020).

La baja aceptación de los usuarios hacia este tipo de vehículos es en gran parte debido a la limitada autonomía que estos ofrecen, así como también, el hecho de que, si se trata de incrementar dicha autonomía, aumentarían los costos, debido al proceso de investigación y el desarrollo de tecnologías.

Finalmente, se toma en cuenta que la investigación experimental y teórica que más hace alusión al actual estudio es el análisis sobre la autonomía de batería en función de variables obtenidas de aplicación de ciclos de conducción y análisis mediante modelo matemático, con lo que se determina autonomía real, calculada y se hace comparaciones con la establecida por fabricante (Duque & Rocano, 2017). Pero es importante destacar que a nivel provincial los estudios sobre autonomía de baterías del EV son insuficientes para contribuir al desarrollo tecnológico local.

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 TRANSPORTE Y MOVILIDAD

2.1.1 MODOS DE TRANSPORTE

Se comprende como modos de transporte a la manera empleada para el desplazamiento de personas u objetos desde un origen hacia un destino (Rojas Quezada et al., 2019, pág. 179), contemplándose una sinergia entre infraestructura, transporte y espacio. Entre los modos de transporte más comunes se encuentran el aéreo, acuático (marítimo y fluvial), terrestre y ferroviario.

2.1.2 MEDIOS DE TRANSPORTE

Se entiende como medios de transporte a los sistemas utilizados en la movilización a través de un determinado modo de transporte. Mediante el uso adecuado de los medios de transporte se busca mejorar la calidad de vida de las personas atendiendo sus necesidades de desplazamiento, a fin de lograr una movilidad basada en la eficiencia y seguridad (Durán et al., 2019, pág. 147). Los medios de transporte son diversos y pueden ser clasificados de acuerdo con su modo, tal como se indica en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Medios de transporte según modos de transporte

Modos de transporte	Medios de transporte
Terrestre	Automóvil, motocicleta, camión, autobús, bicicleta.
Aéreo	Avión, avioneta, helicóptero, teleférico, cohete, dirigible, globo aerostático.
Acuático	Barco, lancha, velero, buque, ferry.
Ferroviario	Ferrocarril.

Fuente: (Closs & Bixby, 2007, pág. 177)

2.1.3 EL CONCEPTO DE MOVILIDAD URBANA

La movilidad urbana permite comprender los desplazamientos en una determinada urbe a través de la relación entre las características socioeconómicas de los habitantes y el espacio.

Bajo este enfoque, el estudio de la movilidad se basa primordialmente en la persona y su entorno y no solo en las movilizaciones, considerando además el uso de técnicas eficientes que preserven el medio ambiente (Vasconcellos, 2019, pág. 11).

2.1.4 PATRONES DE MOVILIDAD EN LA URBE

Los patrones de movilidad están relacionados con los modos de transporte dentro la ciudad, así como también con la manera de trasladarse por parte de la población, el número de viajes y la frecuencia (Rivadeneira, 2021, pág. 13).

2.1.4.1 Metodologías para el análisis de la movilidad urbana

Estas metodologías permiten representar las interacciones entre la oferta del transporte con sus vías de desplazamiento y la demanda de los usuarios por un medio para movilizarse. Si se representa adecuadamente, se podrá obtener un comportamiento muy acercado del sistema de transporte y de los usuarios, a fin de realizar el estudio y/o evaluación de la movilidad en la urbe. Entre las metodologías comúnmente utilizadas se encuentra la de cuatro etapas.

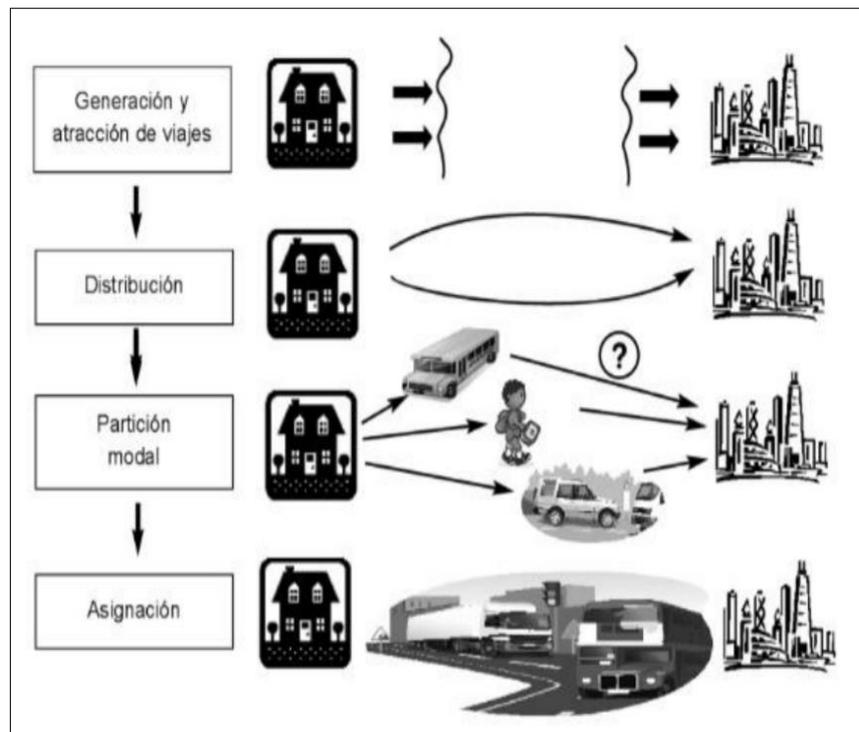


Figura 2.1 Metodología de cuatro fases esquematizada (Barreno-Vereau et al., 2008, pág. 18)

- **Metodología de cuatro etapas**

Bajo este método se requiere información sobre la condición de tránsito de la zona, así como también, los aspectos relacionados con los viajes de los usuarios del transporte. El aporte que puede brindar esta metodología son proyecciones de tránsito relacionadas con posibles mejoras en las rutas. Las fases o etapas que modelan un patrón de movilidad mediante esta metodología son cuatro: La elaboración de viajes, la distribución de estos, la selección modal, y la determinación de rutas (Barreno-Vereau et al., 2008, pág. 15).

1. Generación y atracción de viajes: Principalmente lo que se indica en esta etapa es la cantidad de viajes que empiezan y terminan en zonas delimitadas por el estudio, tomando en cuenta el horario, los lugares de partida y retorno, los rasgos socioeconómicos y la accesibilidad al transporte.
2. Distribución de viajes: Predice la dirección de movilidad entre lugares de origen y de destino. Para esto se toma en cuenta el tiempo, el costo de movilización y la distancia de viaje.
3. Selección modal: Estima la preferencia de cada usuario sobre el modo de transportarse, de esta manera se toma en cuenta el número de viajes de acuerdo con los diferentes modos que se encuentren a disposición.
4. Asignación de rutas: Se determinan rutas tomando en cuenta el modo de transporte, los servicios que se brindan, las capacidades y el número de viajes realizados. Además, se indica la importancia que tiene la oferta de la red vial, puesto que los costos de transporte están relacionados con la velocidad, la longitud de desplazamientos y las capacidades de transporte.

2.1.5 MOVILIDAD ELÉCTRICA

Esta variante en la movilidad se centra en el uso de la electricidad acompañada de innovadoras tecnologías para permitir la implementación y desarrollo de modos y medios para moverse. Dentro de este concepto se contempla a su vez la infraestructura requerida para la normal operación de estos, tales como redes viales, estaciones de carga, entre otros. Al utilizar energía eléctrica como fuerza motriz en vehículos, se solventan las problemáticas relacionadas con la emisión de gases contaminantes por el uso de motores de combustión

interna, evitando los efectos producidos por el cambio climático y contribuyendo a una transición energética (Vargas et al., 2018, pág. 3).

2.2 VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

El vehículo eléctrico históricamente inicia su acelerada popularidad a finales del siglo XIX, luego pasa por una baja participación en el mercado automotriz durante el siglo XX, para finalmente, a inicios del segundo milenio, sobresalir como una alternativa ecológica complementándose con avances tecnológicos que han permitido una mejora sustancial en los diferentes elementos que lo componen.

2.2.1 DEFINICIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

El vehículo eléctrico es un medio de transporte propulsado por uno o más motores eléctricos, la energía demandada por los motores eléctricos es suministrada por el empaquetado de baterías que este incorpora, el cual puede ser recargado a través de un enchufe conectado a la red eléctrica (Bueno Juela & Quizhpe Sinchire, 2017, pág. 6).

2.2.2 TREN DE POTENCIA

El tren de potencia del vehículo eléctrico tiene un flujo de energía que inicia desde el abastecimiento de esta en un punto de carga, que después se almacena en sus baterías, luego se dirige al inversor en donde transforma la corriente continua en alterna para alimentar al motor eléctrico, el cual se encarga de producir giro y se conecta a un engranaje reductor haciendo que varíe la relación de transmisión hacia las ruedas. A continuación, se muestra en detalle los elementos del tren de potencia, así como también otros componentes que incorporan los EV, dejando lo referente a baterías en un apartado más adelante.

2.2.2.1 Inversor

El inversor generalmente se encuentra integrado por un transformador y varios componentes electrónicos de potencia, se encarga de la conversión de corriente continua que proviene de la batería en corriente alterna para sustentar las exigencias de funcionamiento del motor

eléctrico, a su vez el inversor debe ser capaz de gestionar la corriente generada por el motor cuando se encuentra trabajando el sistema de frenado regenerativo (Cuesta, 2017, pág. 26).

2.2.2.2 Engranaje reductor

El engranaje reductor es el elemento encargado de variar la relación de transmisión de velocidad y par entre el motor eléctrico y las ruedas. Comúnmente se aplica una sola relación que va desde 6 a 1 hasta 9 a 1, esto debido a que el torque que transmite el motor eléctrico es brindado desde cero, es decir, no importa el régimen del motor ya que el par entregado será el máximo casi en todo momento (Irene et al., 2019, p. 36).

2.2.2.3 Motor eléctrico

El motor eléctrico es el encargado de generar el movimiento o giro que propulsa las ruedas del vehículo con la energía eléctrica que recibe de la batería, se presentan dos tipos de motores empleados habitualmente en vehículos eléctricos, los motores de corriente alterna (AC) y los motores de corriente continua (DC) (Cuesta, 2017, pág. 24).

2.2.2.4 Convertidor de bajo voltaje

Este elemento convierte la alta tensión que proviene de la batería de tracción del vehículo eléctrico en bajo voltaje, es decir, transforma la tensión a un nivel más apropiado para cargar la batería de 12 V responsable de sustentar la demanda de energía de los accesorios eléctricos del vehículo como luces, bocina, módulos electrónicos, limpiaparabrisas, etc. (Lata & Quintuña, 2018, pág. 10).

2.2.2.5 Sistema de frenado regenerativo

Esta tecnología de recuperación de energía consta de un motor-generador, un inversor o transformador de energía de potencia y una fuente de almacenamiento. El funcionamiento del sistema de manera general responde al aprovechamiento de la energía generada en el frenado del vehículo, cuando no existe frenado el motor eléctrico trabaja como consumidor para impulsar las ruedas motrices, mientras que al realizar el frenado, el motor eléctrico genera la energía que es dirigida al inversor para cargar la batería de tracción.

2.2.3 SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Una batería se compone por un amplio número de celdas, las cuales serán configuradas en serie o paralelo dependiendo si se desea alcanzar mayor voltaje o amperaje, respectivamente (Quiñones et al., 2020, pág. 2).

Las celdas en su forma más básica están conformadas por un electrodo positivo denominado cátodo, uno negativo denominado ánodo, un electrolito que sirve como conductor para el paso de los iones entre los electrodos y un separador que cumple la función de aislar eléctricamente los electrodos (Goodenough, 2018, pág 204). A través de sus celdas electroquímicas, una batería es capaz de almacenar energía eléctrica en forma química para finalmente, según sea el caso, volverla a transformar en energía eléctrica.

2.2.3.1 Parámetros característicos de las baterías

- **Voltaje nominal**

Cada celda que compone a una batería posee un voltaje nominal, el cual indica un valor promedio de voltaje para el correcto funcionamiento de la celda. Este valor cambiará, disminuyendo cuando se emita una corriente y aumentando cuando la batería sea cargada.

- **Capacidad de carga**

El término se refiere a la cantidad de energía eléctrica que puede ser almacenada en la batería. La unidad de medición más común es el amperio-hora (Ah) o el vatio-hora (Wh).

- **Densidad de energía**

Es la cantidad de energía que podrá almacenar una batería en función de su volumen, medida en vatio-hora por metro cúbico (Wh/m^3) o vatio-hora por litro (Wh/l).

- **Energía específica**

Es la cantidad de energía que podrá almacenar una batería en función de su masa, medida comúnmente en vatio-hora por kilogramo (Wh/kg).

- **Potencia específica**

Es la potencia que suministrará la batería en función de su masa, medida generalmente en vatio por kilogramo (W/kg). Ciertos tipos de baterías tienen una buena energía específica pero una baja potencia específica, lo que se traduce en un gran almacenamiento de energía pero que será entregada lentamente.

- **Auto descarga**

Este fenómeno se basa en el hecho de que si las baterías no están en uso constante tienden a descargarse. Cabe recalcar que a mayores temperaturas este fenómeno se incrementará.

- **Vida útil**

El término comprende dos afirmaciones, el primero relacionado con el tiempo en el cual el funcionamiento de la batería se encuentra dentro de los límites permitidos, mientras que el segundo hace referencia a la cantidad de recargas (ciclos) que puede ser sometida la batería sin comprometer sus prestaciones.

- **Estado de carga. State of charge (SOC)**

Indica a través de unidades porcentuales la capacidad disponible $Q(t)$, en relación con la capacidad nominal Q_n (Sundén, 2019), tal como se establece en la Ecuación 2.1. Es decir, se tendrá un 100% de estado de carga cuando la batería almacene la cantidad máxima de energía posible.

$$\text{SOC} = \frac{Q(t)}{Q_n} \times 100\% \quad [2.1]$$

Donde:

SOC: Estado de carga

$Q(t)$: Capacidad disponible

Q_n : Capacidad nominal

- **Estado de Salud. State of health (SOH)**

Es un parámetro que establece el grado de deterioro que posee la batería, a través de la relación existente entre la capacidad medida Q_m y la nominal Q_n , representándose en porcentaje, tal como se muestra en la Ecuación 2.2. Sin embargo, a través de la capacidad no se tiene una alta fiabilidad, por lo cual existen otros métodos para su evaluación. Se tiene previsto que conforme el paso del tiempo exista una degradación de la batería, por lo cual el SOH será menor al 100% (Tian et al., 2020).

$$SOH = \frac{Q_m}{Q_n} \times 100\% \quad [2.2]$$

Donde:

SOH: Estado de salud

Q_m : Capacidad medida

Q_n : Capacidad nominal

- **Profundidad de descarga. Depth of discharge (DOD)**

Es un parámetro que indica lo contrario al estado de carga, es decir, el grado de descarga en el que se encuentra la batería. Por ejemplo, un SOC igual al 70% indica un DOD igual al 30%.

2.2.3.2 Evaluación de estado de carga (SOC)

A fin de facilitar el entendimiento sobre la disponibilidad de energía que se tiene en las baterías hacia el usuario, es importante estudiar las maneras en que puede ser estimada. En este sentido, se describirán los métodos más relevantes a continuación.

- **Impedancia interna**

Este método se basa en que la resistencia interna de la batería variará en función del estado de carga. Bajo esta premisa se tiene que una elevada resistencia representa un estado de baja carga. Un punto negativo de esta técnica es que no se contempla la incidencia de la temperatura en las mediciones (Zhang et al., 2018).

- **Conteo de Coulomb**

Esta técnica es de las más precisas para la determinación del SOC de una batería ya que se encarga de medir la cantidad de corriente que entra y sale de la misma, pudiendo encontrar el SOC mediante la diferencia entre estos (Danko et al., 2019, pág. 188). Este método presenta cierta complejidad y es necesario el uso de sensores.

- **Estimación basada en el voltaje**

En este caso se compara el voltaje actual que presenta la batería con su capacidad máxima. Este procedimiento presenta gran facilidad, sin embargo, no es del todo preciso debido a que las baterías no describen un comportamiento lineal de su voltaje en todos los casos.

2.2.3.3 Evaluación de estado de salud (SOH)

Como se ha mencionado anteriormente, el SOH de una batería permite conocer el grado de envejecimiento y, por ende, pérdidas de las funciones de la batería. En este sentido, los parámetros que indican el SOH son los relacionados con la capacidad para almacenar energía, resistencia interna y auto descarga.

- **Estimación por resistencia interna**

Cuanto mayor sea el envejecimiento, la resistencia interna se verá incrementada. Para medir la resistencia interna se han diseñado varios métodos como la espectroscopía de impedancia electroquímica (Lipu et al., 2018, pág. 5), además de uno más sencillo a través de la medición en los cambios de corriente y diferencia de potencial para determinar la resistencia.

- **Estimación por descarga completa**

Esta prueba se realiza a una batería totalmente cargada aplicándole una descarga constante y controlada para medir la carga entregada y compararla con los datos establecidos por el fabricante o cuando se encontraba nueva (Z. Wang et al., 2019, pág. 837). Este procedimiento presenta desventajas debidas a la larga duración de las pruebas y la desconexión de la batería.

- **Estimación por modelo eléctrico**

El funcionamiento de una batería puede ser esquematizado a partir de un modelo eléctrico basándose en circuitos equivalentes (Ma et al., 2019, pág. 836). Existen diferentes modelos eléctricos, siendo el más sencillo aquel que consta de una fuente de voltaje conectado en serie con una resistencia equivalente. Por otra parte, se puede emplear software de simulación para el análisis tales como Matlab, Proteus, Multisim, entre otros.

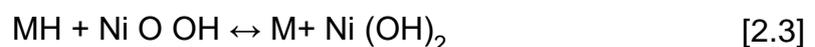
2.2.3.4 Tipos de baterías

A lo largo del tiempo se han desarrollado diversos tipos de baterías gracias al avance de los procesos de fabricación y utilización de diferentes materiales. Por otra parte, se ha evidenciado una mejora en sus prestaciones, así como también, gracias al uso extendido de estas, su costo se ha reducido.

Las baterías de Plomo-Ácido son las más comunes en cuanto al sector automotriz se refiere, específicamente en los vehículos que cuentan con un MCI (Cueva Sánchez et al., 2018, pág. 167). Sin embargo, se tiene que la capacidad es baja, exige mantenimiento continuo y posee una vida útil de alrededor de 500 a 600 ciclos de recarga (Lach et al., 2019, pág. 696). Por otro lado, las baterías de Níquel-Cadmio frente a las baterías de plomo presentan un mayor costo y mejoras relacionadas con la capacidad, vida útil de 1500 ciclos, resistencia a sobrecargas y funcionamiento a bajas temperaturas. Estos dos tipos de baterías actualmente no representan mayor relevancia en cuanto a su utilización en los vehículos híbridos o eléctricos, siendo las más empleadas las que se presentan a continuación.

- **Baterías de Níquel-Hidruro metálico**

Se tiene un cátodo de níquel y un ánodo de hidruro metálico. Durante la descarga de la batería el oxihidróxido de níquel se transforma en hidróxido de níquel. Por otra parte, en el ánodo se produce una liberación de hidrógeno del metal, reaccionando y produciendo electrones y agua. La reacción química producida se indica en la Ecuación 2.3.



Al sustituir el ánodo de cadmio se solventan los problemas de contaminación y aporta beneficios como una mayor densidad energética y energía específica, así como también, mayor rapidez de recarga (Zelinsky et al., 2018, pág. 1). Como puntos desfavorables se puede citar un mayor índice de auto descarga, bajo rendimiento y mayores costos que las del tipo Níquel-Cadmio. En la Tabla 2.2, se presentan los parámetros de funcionamiento.

Tabla 2.2 Parámetros de la batería de Níquel – Hidruro metálico

Parámetro	Cantidad
Voltaje nominal por celda	1,2 voltios
Resistencia interna	0,06 ohmios por celda (para una celda de 1 Ah)
Energía específica	65 Wh/kg
Densidad de energía	150 Wh/l
Potencia específica	200 W/kg
Temperatura de operación	Temperatura ambiente
Tasa de auto descarga	Hasta un 5% por día
Vida útil	1 000 ciclos
Tiempo de recarga	1 h

Fuente: (Larminie & Lowry, 2003, pág. 39)

- **Baterías de Ion de Litio**

En esta configuración se tiene que el ánodo está conformado por litio y carbono en forma de grafito, mientras que el cátodo por óxido de litio. Por otra parte, el electrolito se encontrará en estado líquido (Q. Wang et al., 2019, pág. 98).

Tabla 2.3 Parámetros de la batería de ion de litio

Parámetro	Cantidad
Voltaje nominal por celda	3,3 - 3,7 Voltios
Resistencia interna	0,014 ohmios
Energía específica	90 – 130 Wh/kg
Densidad de energía	140 – 200 Wh/l
Potencia específica	250 – 450 W/kg
Temperatura de operación	Temperatura ambiente
Tasa de auto descarga	Hasta un 10% por mes
Vida útil	800 – 1 200 ciclos

Fuente: (Jusoh & Daud, 2017, pág. 2781)

En el proceso de carga, al proveer energía se logra que los iones de litio presentes en el cátodo se reduzcan, originando un desplazamiento de estos hacia el ánodo, adhiriéndose al carbono, mientras que en la descarga ocurre el efecto contrario de desplazamiento.

- **Baterías de polímero de Litio**

Estas baterías usan para el ánodo metal de litio y para el cátodo ferro fosfato de litio (LiFePO₄). Su principio de funcionamiento es el mismo que las baterías de ion litio. Constituyen un avance al usar como electrolito un polímero en estado sólido lo cual permite una reducción de tamaño y peso, así como también, se tiene mayores índices de eficiencia, densidad de energía y seguridad (Fatima Brondani et al., 2018, pág. 296).

Tabla 2.4 Parámetros de la batería de polímero de litio

Parámetro	Cantidad
Voltaje nominal por celda	3,2 Voltios
Resistencia interna	<0,001 ohmios
Energía específica	90-160 Wh/kg
Densidad de energía	325 Wh/l
Potencia específica	200 W/kg
Temperatura de operación	Temperatura ambiente
Vida útil	3 000 ciclos

Fuente:(Chin et al., 2015)

2.2.4 RECARGA DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

La recarga del vehículo eléctrico es un procedimiento que tiene variada duración, dependiendo del tipo de recarga al cual se está limitando. Hay la recarga rápida que puede durar varios minutos y se realiza en electrolinerías que poseen equipos elaborados para generar la tensión y corriente necesarias para este tipo de carga, y la carga lenta cuyo punto de abastecimiento puede ser doméstico, pero que requiere de mayor tiempo. (Duque & Rocano, 2017, pág. 5).

A continuación, se indican los niveles de recarga, tipos de conectores eléctricos y modos de carga que comúnmente se emplean en los vehículos eléctricos de actualidad.

2.2.4.1 Niveles de carga

Los niveles de carga en los EV pueden ser clasificados de acuerdo con la velocidad y potencia de recarga que admite el vehículo, en función del paquete de baterías que incorpora, el tipo de conector de carga y la fuente de alimentación. De esta manera, en la Tabla 2.5 se pueden identificar los niveles de carga de los EV.

Tabla 2.5 Niveles de carga

Nivel de recarga	Descripción	Potencia (kW)	Tiempo de carga aproximado (h)
Súper lenta	Utiliza un enchufe convencional para recargas de batería ocasionales.	2,3	10 - 12
Lenta	Está diseñada para cargar el vehículo eléctrico en puntos de carga dispuestos en los domicilios o pequeños garajes comunitarios.	3,3 - 3,7	8
Semi rápida	Estaciones de carga dispuestas en centros comerciales, parqueaderos, etc.	22	1 - 2
Rápida	Disponible en electrolinerías o estaciones de carga rápida.	44 - 50	0,5 - 0,6

Fuente: (Pañero, 2019, pág. 1)

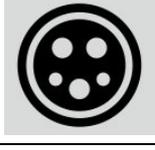
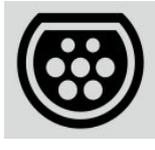
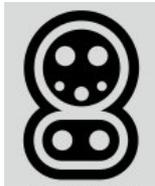
2.2.4.2 Tipos de conectores

Al inicio cada fabricante optó por su propio tipo de conector sin llegar a una estandarización en concreto, así como también, el empleo de corriente alterna para carga lenta o normal con inversor y de corriente directa con abastecimiento de voltaje alto y corriente continua ha dado como consecuencia que los conectores sean variados (Sociedad de Técnicos de Automoción STA, 2011, pág. 67).

De esta manera, los conectores no solo varían en la forma, sino también han sido diseñados para soportar una potencia, un nivel y modo de carga específicos, tal como se indica en la Tabla 2.6.

En este sentido, los siete tipos de conectores que se utilizan actualmente se muestran a continuación de acuerdo con la aplicación de vehículo eléctrico, indicándose además una imagen referencial de la forma aproximada del conector real.

Tabla 2.6 Tipos de conectores para vehículos eléctricos

Tipo de conector	Número contactos	Conexión de carga	Nivel de recarga	Modo de recarga	Aplicación	Imagen y aplicación
Tipo F Schuko	2	Alterna monofásica 220 V	Súper lenta, Lenta	1 y 2	Renault Twizy 2011, motos eléctricas	
Tipo 1, SAE J1772	5	Alterna monofásica 220 V	Lenta y semi rápida.	2 y 3	Nissan Leaf 2010, Chevrolet Bolt	
Tipo 2, Mennekes	7	Alterna monofásica 220 V, trifásica 400V	Lenta y semi rápida.	2 y 3	Nissan Leaf 2018, Tesla S	
Tipo 3, Scame	7	Alterna monofásica 220 V, trifásica 400V	Semi rápida	3	Micro vehículos 2010, reemplazado por Tipo 2	
Combinado CCS1 (SAE J1772+ 2 contactos DC)	7	Alterna monofásica 220 V, trifásica 400V	Lenta, semi rápida y rápida	2, 3 y 4	VW Golf EV, Tesla 3	
		Continua				
Combinado CCS2 (Mennekes + 2 contactos DC)	9	Alterna monofásica 220 V, trifásica 400V.	Lenta, semi rápida y rápida	2, 3 y 4	VW Golf EV, Tesla 3	
		Continua				
CHAdeMO	10	Continua	Rápida	4	N. Leaf 2018, Mitsubishi EV-Outlander	

Fuente: (Pañero, 2019, p. 1 - 4)

2.2.4.3 Modos de carga

Comúnmente se designan 4 modos de carga en los EV en base al tipo de corriente, tensiones de alimentación y amperajes que admiten cada uno, así como también, el grado de

comunicación de estos con la red, permitiendo la incorporación de sistemas de seguridad e información del estado de carga. En la Tabla 2.7 se indican los modos de recarga de los EV.

Tabla 2.7 Modos de carga del EV

Modo	Características	Tipo de conexión, voltaje	Amperaje
Modo 1	No existe comunicación entre la red eléctrica y el vehículo.	Red monofásica de 220 VAC.	Hasta 15 A
Modo 2	Bajo grado de comunicación entre la red y el vehículo, al permitir la verificación del estado de la conexión.	A la red monofásica 220 VAC.	Hasta 32 A
Modo 3	Alto grado de comunicación del EV con la red para la identificación de tipo de EV y secuencia de recarga adecuada.	Red monofásica de 220 VAC o trifásica de 400 VAC.	Hasta 32 A si es monofásica. Hasta 63 A si la conexión es trifásica.
Modo 4	Grado de comunicación del modo 3. La recarga se realiza en corriente continua ya que la estación de carga incorpora un convertidor AC-DC, así como también, un sistema de protección.	Conversión de voltaje AC-DC de hasta 500 VDC.	Hasta 200 A

Fuente: (Fernández & Coello, 2015, pág. 2)

2.2.5 AUTONOMÍA DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

La autonomía se refiere a la duración del recorrido que puede brindar un ciclo de carga completo del paquete de baterías. Dicho recorrido se mide kilómetros y este dependerá de diversos factores como la capacidad de las baterías, condiciones geográficas, frenado regenerativo, velocidad de circulación, entre otros. Actualmente se habla de autonomías muy limitadas en comparación con las que brinda un vehículo con motor térmico, indicándose autonomías que van desde los 80 km hasta los 240 km en vehículos de calle. La proyección de diseño de nuevos modelos de vehículos eléctricos con tecnologías más favorables permitirá alcanzar autonomías mayores.

2.3 CICLOS DE CONDUCCIÓN

Un ciclo de conducción se compone por una serie de velocidades versus tiempo y tiene como objetivo representar una condición real de conducción en un determinado espacio. La

aplicación de estos ciclos es través de un banco dinamométrico y bajo un entorno de condiciones controladas (Shen et al., 2018, pág. 346).

Los ciclos de conducción constituyen una herramienta imprescindible en la evaluación de emisiones contaminantes y consumo de combustible en vehículos con MCI (Gong et al., 2018, pág. 901). Mientras que en vehículos eléctricos será objeto de estudio el dimensionamiento de trenes de potencia, el consumo energético y la autonomía (Davari et al., 2017, pág. 1).

2.3.1 CICLOS DE CONDUCCIÓN EN EL MUNDO

2.3.1.1 Ciclos de conducción en la Unión Europea

Desde septiembre del 2019 en la Unión Europea (UE) se implementó como ciclo de conducción para el análisis y medición de emisiones al WLTP (Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure) en reemplazo del NEDC (New European Driving Cycle) (ACEA - European Automobile Manufacturers' Association, 2019, pág. 1), siendo este último poco fiable debido a su poca concordancia frente a pruebas reales, ya que cuenta con varios perfiles de velocidad constante, presenta aceleraciones suaves, largos períodos de inactividad y una baja velocidad promedio. A continuación, se profundiza sobre las características y parámetros de estos dos ciclos de conducción.

- **Ciclo de conducción NEDC**

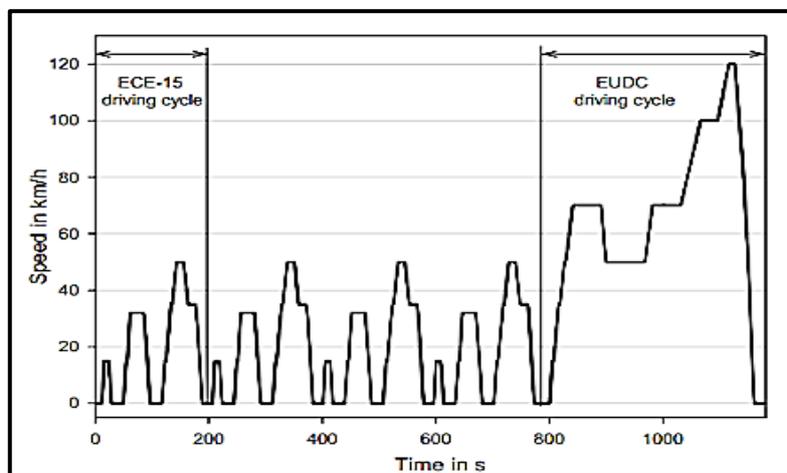


Figura 2.2 Ciclo de conducción NEDC
(Bielaczyc et al., 2019)

Utilizado ampliamente en pruebas de emisiones y consumo de combustible en vehículos livianos, este ciclo de conducción se compone por el ciclo urbano ECE-15 (repetido 4 veces) y el ciclo extra urbano EUDC, tal como se muestra en la Figura 2.2.

En la Tabla 2.8 se indican los parámetros del ciclo de conducción NEDC, así como también de los ciclos que lo componen.

Tabla 2.8 Parámetros de los ciclos de conducción ECE-15, EUDC y NEDC

Parámetro	ECE-15	EUDC	NEDC
Duración	195 s	400 s	1180 s
Distancia	994,6 m	6 955,07 m	11 016,63 m
Velocidad máxima	50 km/h	120 km/h	120 km/h
Velocidad promedio	18,4 km/h	62,6 km/h	33,6 km/h
Aceleración promedio positiva	0,348 m/s ²	0,266 m/s ²	0,528 m/s ²
Número de paradas	4	2	14

Fuente: (Barlow et al., 2009, pág. 8)

- **Ciclo de conducción WLTP**

El WLTP se aplica a vehículos livianos con MCI para la estimación de emisiones y consumo, mientras que en vehículos eléctricos es utilizado como herramienta para la estimación de la autonomía (Bielaczyc & Woodburn, 2019, pág. 86). Este ciclo fue diseñado a fin de obtener resultados los más cercanos posible a la realidad.

Tabla 2.9 Parámetros del ciclo de conducción WLTP

Parámetro	Valor
Fases	Hasta 4 fases: Baja, Media, Alta, Súper alta, dependiendo de la clase del vehículo.
Duración	1 800 segundos
Distancia	23 274 metros
Velocidad promedio	34 km/h
Velocidad máxima	131 km/h
Tiempo de inactividad	13%
Aceleración promedio	0,39 $\frac{m}{s^2}$
Aceleración máxima	1,58 $\frac{m}{s^2}$

Fuente: (Kappler, 2017, pág. 4)

Como se puede observar en la Figura 2.3 el ciclo de conducción completo consta de 4 fases. Sin embargo, según la clase de vehículo el número de fases será distinto.

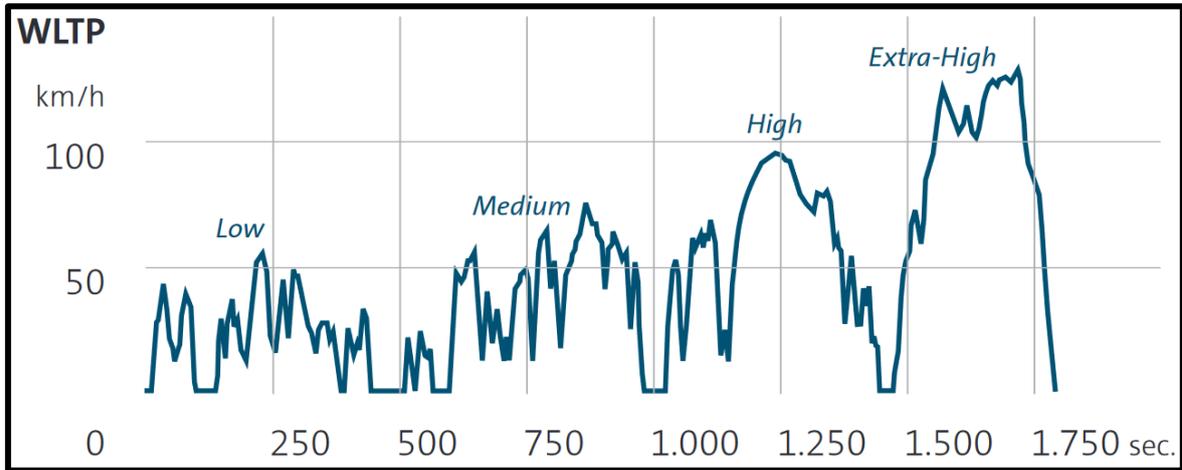


Figura 2.3 Ciclo de conducción WLTP
(Kappler, 2017, pág. 4)

2.3.1.2 Ciclos de conducción en Estados Unidos

Los ciclos de conducción más importantes y utilizados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) para la evaluación de emisiones y consumo de combustible son el Procedimiento de Prueba Federal EPA (FTP-75 por sus siglas en inglés), Programa Urbano de Dinamómetro (UDDS) más conocido como FTP-72, y el Programa de Conducción de Economía de Combustible en Carretera (HWFET). Todos son aplicados en vehículos livianos con MCI, mientras que los dos últimos han sido utilizados para evaluar la autonomía de los vehículos eléctricos (Huynh & Hsieh, 2018, pág. 5).

- **Ciclo de conducción FTP-75**

El FTP-75 es un ciclo de conducción que tiene como objetivo representar una condición de manejo en ciudad. Consta de tres fases las cuales son: fase transitoria de arranque en frío, fase estabilizada y fase transitoria de arranque en caliente (Choi et al., 2019, pág. 2).

Cabe recalcar que una vez finalizada la fase estabilizada se apaga el motor durante 10 minutos y se prosigue con la fase de arranque en caliente. Sin considerar el tiempo de parada del motor, el ciclo dura 1874 segundos, alcanzándose una velocidad promedio es de 34,1 km/h y una distancia total de recorrido de 17,77 km.

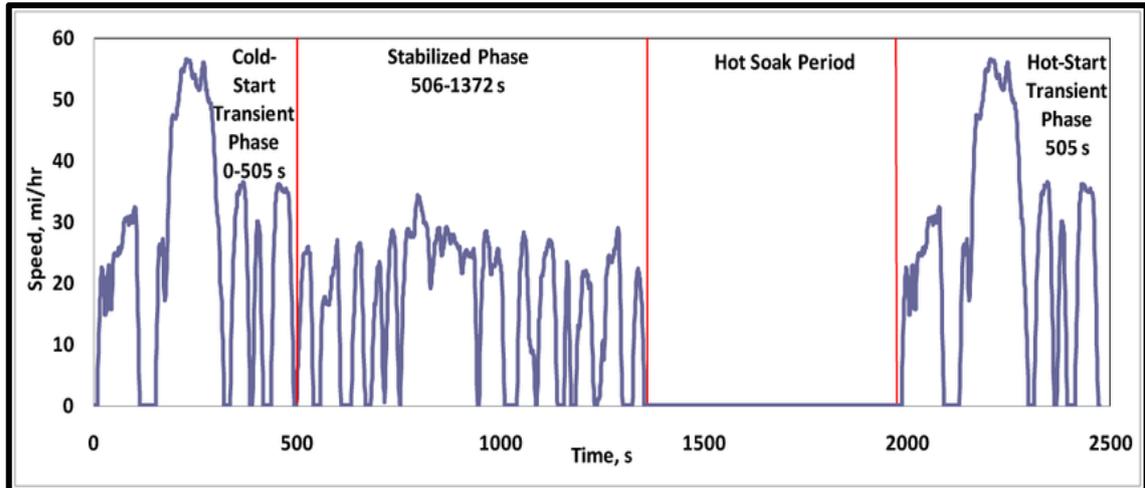


Figura 2.4 Ciclo de conducción EPA FTP-75
(Karavalakis et al., 2013, pág. 4)

- **Ciclo de conducción UDDS o FTP-72**

Este ciclo de conducción puede ser interpretado como el FTP-75 pero sin la fase transitoria de arranque en caliente, por lo cual se tendrán dos fases, siendo la duración de la primera fase 505 segundos y de la segunda 867 segundos. Además, se tiene una longitud de recorrido de 12,07 km, una velocidad media de 31.5 km/h y una velocidad máxima de 91,25 km/h (Huynh & Hsieh, 2018, pág. 6).

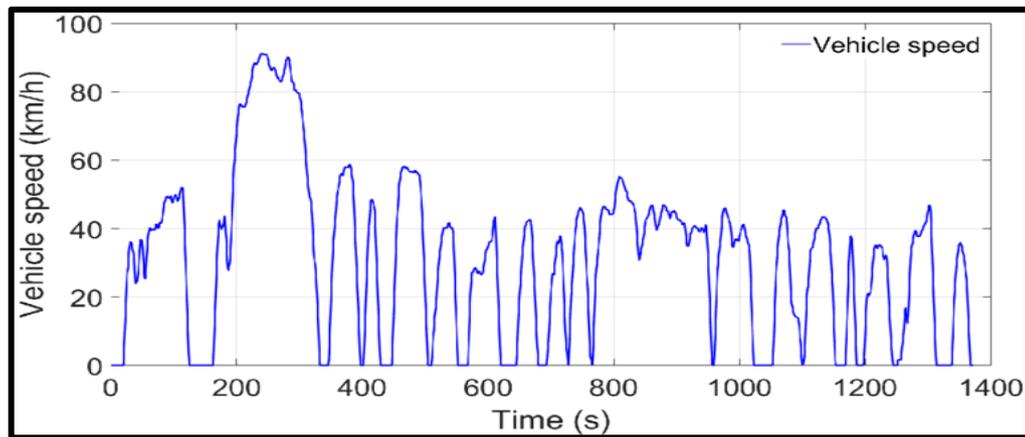


Figura 2.5 Ciclo de conducción FTP-72
(Hu et al., 2019, pág. 6)

- **Ciclo de conducción EPA HWFET**

Este ciclo de manejo ha sido diseñado para representar una conducción de carretera en zonas rurales y en autopistas interestatales con un tráfico muy fluido. La ejecución de la prueba es de manera continua sin paradas del motor y a velocidades medias durante todo el ensayo. Al

final del ciclo se tendrá una distancia recorrida de 16,45 km, una velocidad promedio de 77,7 km/h y un tiempo transcurrido de 765 segundos (Karabasoglu & Michalek, 2013, pág. 450).

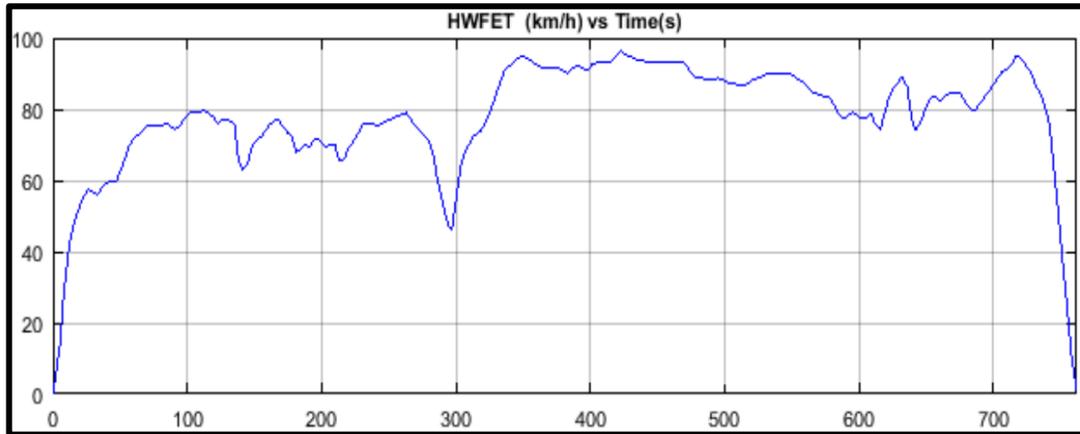


Figura 2.6 Ciclo de conducción EPA HWFET

(Jaafar & Rahman, 2020, pág. 13 779)

2.3.1.3 Ciclos de conducción en Japón

- **Ciclo de conducción JC08**

Este ciclo de conducción es actualmente el más empleado para la homologación de emisiones y consumo en vehículos livianos con MCI, así como también, para la determinación de autonomía de vehículos eléctricos en Japón. Representa unas condiciones de manejo urbanas con fuertes variaciones de aceleración y se lo realiza con arranque en frío y caliente. Se tiene una velocidad promedio de 24,4 km/h, una duración de 1204 segundos y un recorrido de 8,17 km (Zhao et al., 2020, pág. 1).

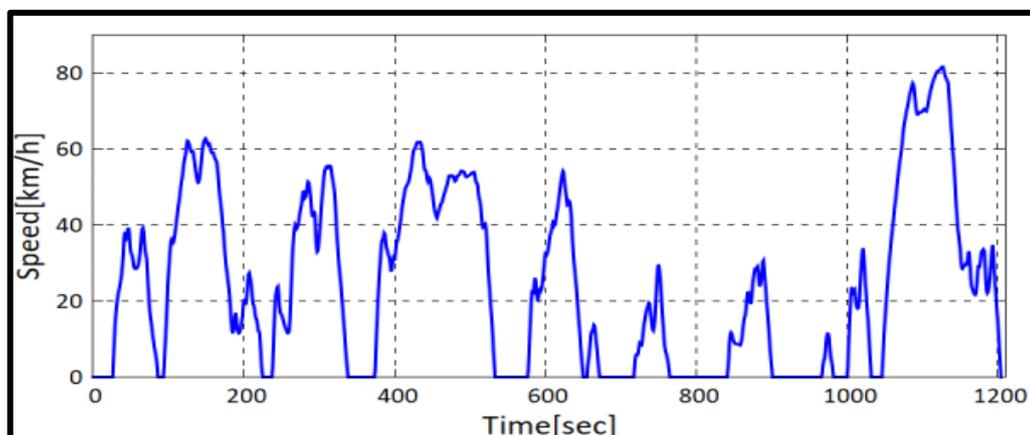


Figura 2.7 Ciclo de conducción JC08

(Tamura et al., 2019, pág. 5)

2.3.1.4 Ciclos de conducción desarrollados en Ecuador

- **Ciclo de conducción en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ)**

El ciclo de conducción desarrollado para el DMQ consta de tres ciclos denominados para ciudad, carretera y en combinación, mediante el registro de los parámetros medidos en 72 recorridos, logrando una distancia de 1 326 km en un tiempo total de 59 horas de conducción (Quinchimbla & Solís, 2017).

En la Figura 2.8 se muestra el ciclo de conducción de ciudad desarrollado para el DMQ.

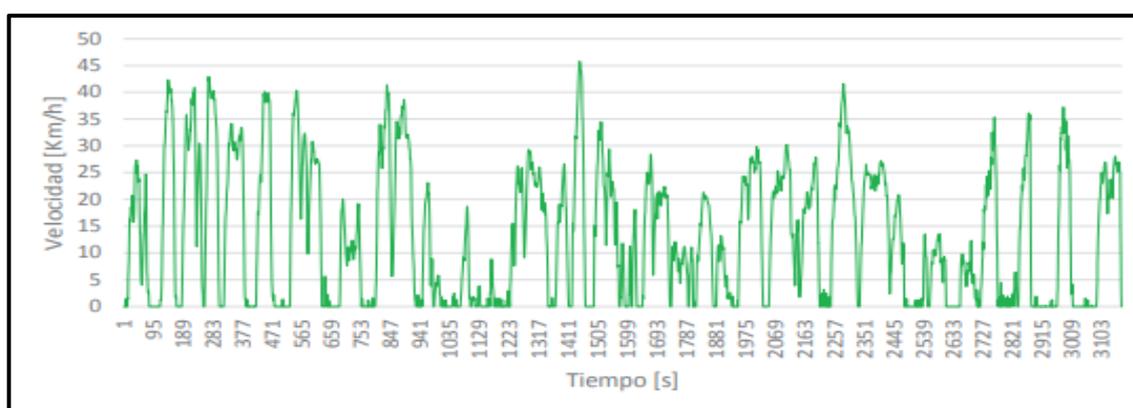


Figura 2.8 Ciclo de conducción para ciudad del DMQ.
(Quinchimbla & Solís, 2017, pág. 54)

Por otra parte, en la Tabla 2.10 se indican los parámetros del ciclo de conducción del Distrito Metropolitano de Quito y los valores en los que se rigen cada uno.

Tabla 2.10 Parámetros del ciclo de conducción para ciudad del DMQ.

Parámetro	Valor
Duración	3 169 s
Distancia	11 914,47 km
Velocidad máxima	45,77 km/h
Velocidad promedio	13,26 km/h
Velocidad mínima	0 km/h
Aceleración promedio positiva	0,348 m/s ²
Aceleración positiva máxima	1,891 m/s ²
Número de paradas	58

Fuente: (Quinchimbla & Solís, 2017, pág. 54)

2.3.2 MÉTODOS PARA EL DESARROLLO DE LOS CICLOS DE CONDUCCIÓN

2.3.2.1 Técnicas de obtención de datos e instrumentación

Las técnicas para obtener datos sobre los ciclos de conducción que son empleadas a nivel general toman en cuenta parámetros como: velocidad, duración del recorrido, aceleración, distancia, entre otros.

- **Técnica On Board**

Se realiza un registro de las mediciones de manera directa cuando se efectúa el ensayo de conducción. Esta técnica es utilizada para vías que presentan un tráfico irregular y se recomienda que se alterne la persona encargada de dirigir el vehículo, a fin de analizar de mejor manera el comportamiento de conducción sobre una determinada ruta. Los equipos empleados para la medición de las características cinemáticas consisten en módulos GPS, encargados de registrar y almacenar los datos segundo a segundo. (Calva & Flores, 2020, pág. 20).

- **Técnica de seguimiento de vehículo**

Al efectuar el seguimiento de un vehículo tomado como objetivo, el vehículo que persigue emula la conducción del primero dentro de la ruta ya seleccionada, en caso de desvío de la ruta, se debe perseguir a otro que, sin importar las características de manejo debe continuar la recopilación de los patrones de conducción del vehículo objetivo.

Como desventajas de esta técnica se tiene que existe gran probabilidad de exceder los límites de velocidad, el vehículo objetivo cambie el comportamiento de conducción de manera imprevista por incomodidad de seguimiento, así como también, la pérdida de vista de dicho vehículo (Calva & Flores, 2020, pág. 20).

2.3.3 MÉTODOS PARA LA SELECCIÓN DE RUTAS

Para la selección de las rutas sobre las cuales se efectúa el estudio y recolección de datos, se analizan vías con una intensidad de flujo vehicular considerable, además, dependiendo del

tipo de estas se pueden clasificar las rutas a nivel urbano, rural y de carretera. Por otro lado, se debe tomar en cuenta el uso de la red vial de la ciudad respecto al tránsito de los usuarios en sus actividades cotidianas, es decir, para el desplazamiento del trabajo hacia el hogar, cuando se realice compras, por motivo de estudios, paseo, etc. (Quinchimbla & Solís, 2017, pág. 19).

Además de los criterios mencionados se pueden considerar también los lineamientos para la conformación de rutas de acuerdo con reglamentos sobre ensayos de conducción bajo condiciones reales (RDE), siendo uno de estos el Reglamento UE 2017/1151.

Para los ensayos RDE, se establecen ciertos parámetros geográficos y de circulación que deberá cumplir la ruta diseñada. De esta manera, en la Tabla 2.11 se presentan algunos de estos lineamientos.

Tabla 2.11 Condiciones para el desarrollo de ensayos de conducción real (RDE)

Tipo de recorrido	Velocidad (km/h)	Porcentajes de reparto de recorrido (%)	Distancia mínima del recorrido (km)	Tiempo de duración (h)
Urbano	0 a 60	34 ± 10	16	1,5 - 2
Rural	60 a 90	33 ± 10	16	
Carretera	90 a 145	33 ± 10	16	

Fuente: (SERNAUTO, 2017, pág. 19)

CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 METODOLOGÍA

En este capítulo se aborda la metodología empleada para cumplir con los objetivos propuestos con anterioridad, siguiendo un orden lógico y sistemático de las tareas que deben ser llevadas a cabo, a fin de permitir un desarrollo organizado del trabajo de grado.

En este sentido, en la Figura 3.1 se indican de manera metódica los pasos que conforman el proceso para el análisis de la autonomía de un vehículo urbano eléctrico, los cuales serán desarrollados a profundidad a lo largo de este capítulo.

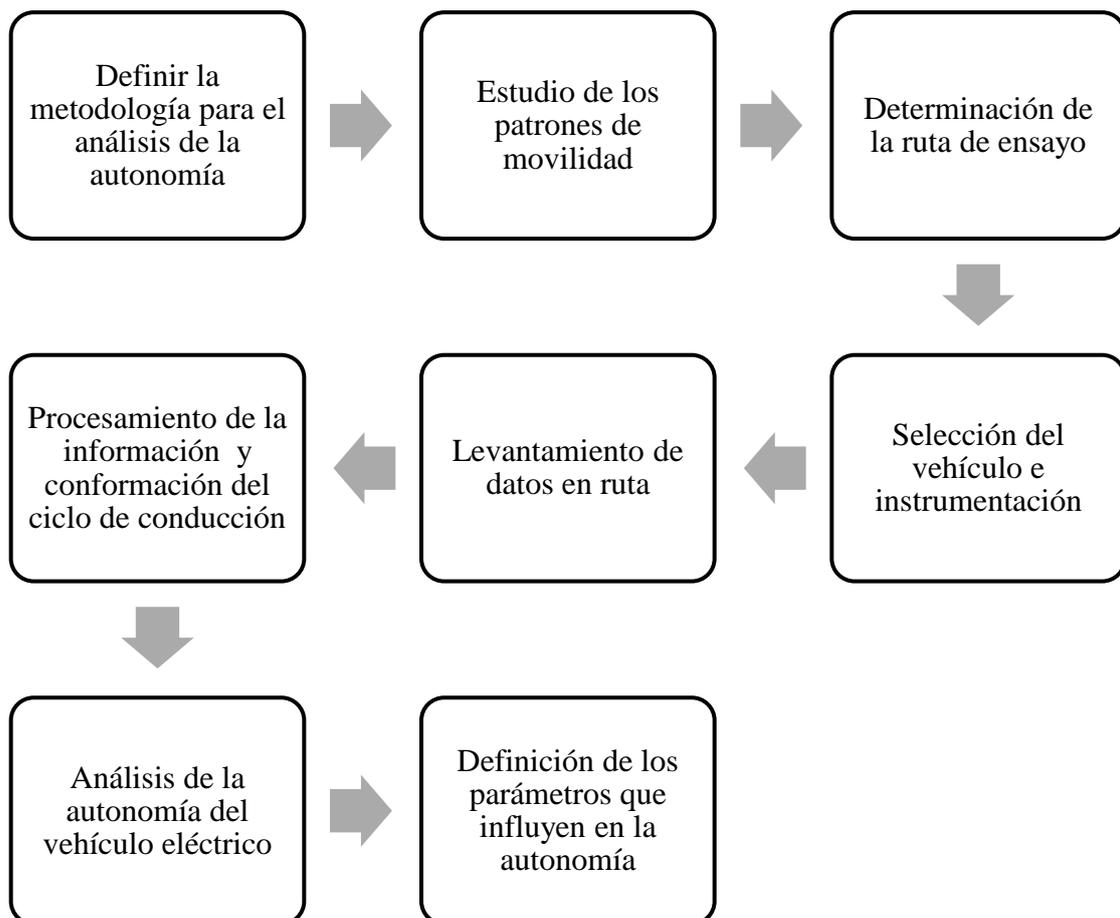


Figura 3.1 Proceso metodológico para análisis de autonomía del vehículo urbano eléctrico

3.2 ESTUDIO DE LOS PATRONES DE MOVILIDAD

3.2.1 DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.2.1.1 Cantón Ibarra

La información requerida respecto a la caracterización de la ciudad ha sido obtenida a través de la revisión bibliográfica del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT), documento el cual ha sido realizado por la Dirección de Planificación y Desarrollo Territorial del Municipio de Ibarra.

3.2.1.2 Zonificación del territorio urbano del cantón Ibarra

La parte urbana del cantón fue sujeto de análisis para establecer zonas de tránsito que definan de mejor manera los patrones de movilidad, ya que es el sector urbano donde ocurren los eventos de movilidad más complejos y en mayor número. Por esta razón, a lo largo del método de 4 etapas será objeto de estudio únicamente esta parte del cantón, con el fin de desarrollar rutas urbanas basadas en los patrones de movilidad y atractores de viaje de la ciudad de Ibarra. En este sentido, se realizó la división de la parte urbana del cantón Ibarra en zonas, de acuerdo con las parroquias y barrios, según lo establecido por el PDOT. Además, se hizo uso del Plan de Movilidad Sustentable del cantón Ibarra, con el fin de realizar la zonificación de la urbe en función de los atractores de viaje definidos en el documento.

Para una demarcación dinámica de las zonas se empleó la plataforma My Maps, desarrollada por Google, Inc., mediante la cual se pueden trazar polígonos correspondientes a áreas sobre el mapa de la ciudad de Ibarra. Además, esta aplicación web permite la fácil identificación de parroquias, barrios, vías y atractores de viaje presentes en cada zona.

3.2.2 MÉTODO DE 4 ETAPAS

El modelo de cuatro etapas es la metodología escogida para el estudio de los patrones de movilidad de la ciudad de Ibarra, consta de cuatro fases las cuales se denominan de la

siguiente manera: generación y atracción de viajes, distribución de viajes, partición modal y asignación de rutas.

La información requerida fue obtenida mediante la aplicación de una encuesta dirigida a la población de la ciudad de Ibarra, ya que a través de esta técnica es posible obtener información relacionada con la creación y atracción de viajes, predicción de flujos de tránsito origen-destino (OD), manera de trasladarse de los usuarios con su preferencia sobre el medio de transporte, y la producción de modelos de flujos de tránsito y su trayectoria, asignando las mejores rutas posibles. A continuación, se describe cada una de las fases que conforman el modelo de cuatro etapas.

3.2.2.1 Etapa 1. Generación y atracción de viajes

En la primera etapa del método se calcula la cantidad de viajes producidos y atraídos por cada zona delimitada, de manera que se da importancia a la cantidad de viajes entre las zonas, mas no a la conexión entre orígenes y destinos. A continuación, se indica la ecuación correspondiente a la primera etapa del método.

$$O_i = D_j \quad [3.1]$$

Donde:

O_i : Viajes resultantes que se originan en la zona i

D_j : Viajes resultantes captados por la zona j

- **Encuesta**

Como se mencionó anteriormente la encuesta ha sido el medio empleado para el estudio de los patrones de movilidad de la ciudad de Ibarra con la finalidad de recolectar información sobre los desplazamientos de la población, el número de veces que estos son realizados y el modo de transporte empleado.

El modo de aplicación de la encuesta para este estudio se realizó de dos formas, la primera mediante el envío del formulario en línea creado en Microsoft Forms y la segunda a través

de la aplicación de formularios físicos destinados directamente a la población. El formato de la encuesta se presenta en el Anexo I.

Para la tabulación de los resultados de la encuesta se hizo uso de los recursos que brinda Microsoft Forms, relacionados con la exportación de los resultados a un formato .xlsx, el cual permite ser gestionado por el software Microsoft Excel. Por otro lado, las encuestas aplicadas de manera física fueron añadidas manualmente a la misma hoja de cálculo, a fin de permitir la tabulación completa de la información.

- **Población**

La población para el estudio corresponde a los habitantes de las parroquias urbanas de la ciudad de Ibarra, para lo cual fue necesario el uso de la información proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). Así como también, se consultó el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Ibarra, para obtener cifras poblacionales específicas de la ciudad.

- **Muestra**

El tamaño de muestra permite a los investigadores saber cuántos individuos son necesarios estudiar, para poder estimar un parámetro determinado con el grado de confianza deseado, o el número necesario para poder detectar una determinada diferencia entre los grupos de estudio, suponiendo que existiese realmente (Karim et al., 2019, pág. 227).

El cálculo del tamaño de la muestra es una función matemática que expresa la relación entre las variables, cantidad de participantes y poder estadístico, siendo calculada a través de la Ecuación 3.2.

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot q}{e^2 \cdot (N - 1) + Z^2 \cdot p \cdot q} \quad [3.2]$$

Donde:

n: Tamaño de la muestra

Z: Nivel de confianza

- p: Probabilidad de obtener un resultado exitoso
q: Probabilidad de obtener un resultado fallido
N: Población
e: Margen de error muestral

3.2.2.2 Etapa 2. Distribución de viajes

La segunda etapa del método se refiere a la estimación del número de viajes efectuados entre las zonas ya delimitadas con anterioridad. Es decir, en esta etapa se cuantifica el flujo de viajes que sucede entre cada una de las zonas considerando el origen y el destino de estos.

El producto de la distribución de viajes será la conformación de una matriz origen destino (matriz OD), en donde se mostrará el flujo de viajes de cada una de las zonas delimitadas denominado V_{ij} , así como también, los vectores de atracción de viajes (D_j) y los vectores producción de viajes (O_i), obtenidos a través de la suma de las columnas y filas de cada zona, respectivamente. En la Figura 3.2 se indica una matriz origen destino con los elementos que la conforman.

i / j	zona 001	zona 002	...	zona 426	zona 427	Total (O_i)
zona 001						
zona 001						
...				V_{ij}		$O_i = \sum_{fila i}$
zona n						
Total (D_j)				$D_j = \sum_{columna j}$		

Figura 3.2 Elementos de una matriz origen destino
(Barreno-Vereau et al., 2008, pág. 39)

En función del origen y destino de los viajes se tendrán dos tipos de modelos. Por un lado, cuando existan un viaje entre zonas de origen y destino distintas se tratará de un modelo de viaje interzonal. Mientras que en el caso de que el viaje tenga por origen y destino la misma

zona se lo denominará modelo de viaje intrazonal. Para el cálculo del flujo de viajes de cada una de las zonas (V_{ij}) se utiliza la siguiente ecuación:

$$O_i, D_j = V_{ij} \quad [3.3]$$

Donde:

O_i : Viajes resultantes que se originan en la zona i

D_j : Viajes resultantes captados por la zona j

V_{ij} : Total viajes generados en la zona i atraídos por la zona j

3.2.2.3 Etapa 3. Partición modal

Después de analizar los flujos de viajes que se obtienen de la fase dos, en esta tercera fase de partición modal se estudia la preferencia del usuario al elegir un determinado modo de transporte.

Para el actual caso de estudio se consideró únicamente el modo de transporte motorizado ya que las rutas diseñadas son para este tipo de vehículos. En este sentido, se han definido los medios de transporte motorizados más utilizados en la ciudad de Ibarra, con lo cual se ha añadido una pregunta sobre la preferencia de estos en la encuesta.

Para el estudio sobre la preferencia de los modos de transporte se emplea la Ecuación 3.4.

$$\sum_m V_{ij}^m = V_{ij} \quad [3.4]$$

Donde:

m : modo de transportarse

V_{ij} : viajes de las zonas de origen i con destino j

3.2.2.4 Etapa 4. Asignación de rutas

Para efectuar la cuarta y última etapa del método aplicado para el análisis de movilidad, se definen los parámetros que debieron cumplir las rutas urbanas diseñadas:

- Se consideran los atractores de viaje más importantes de cada una de las zonas y las vías de acceso más cercanas a estos para el inicio, trayecto y final de la ruta.
- Las rutas urbanas serán basadas en la matriz origen destino desarrollada ya que mediante esta se establecen las rutas de mayor concurrencia de la población según el número de viajes entre zonas. Además, se consideran las zonas de mayor generación y atracción de viajes para la conformación del trayecto.
- Se utilizarán avenidas y calles más transitadas del cantón Ibarra que se encuentren cercanos a los centros de atracción de viaje establecidos, así como también, se tomará en consideración los algoritmos de Google Maps sobre el tráfico y la preferencia de vías para la conformación de las rutas.
- Debido a que los mayores flujos de viajes se presentan hacia las zonas del hipercentro y para no tener rutas repetitivas ni cortas de longitud, se diseñarán rutas que atraviesen las zonas de hipercentro (ZH) y tengan su destino en otra zona ya sea urbana (ZU) o perimetral (ZP).

Finalmente, para el trazo de las rutas sobre mapas que faciliten la identificación de vías y atractores de viaje presentes en las zonas se optó por emplear nuevamente la plataforma Google My Maps ya que permite el diseño de rutas para automóviles contemplando los sentidos de circulación de las vías y el tráfico, logrando una correcta definición de estas.

3.3 DETERMINACIÓN DE LA RUTA DE ENSAYO

Para el desarrollo de las pruebas experimentales enfocadas a la obtención de ciclos de conducción y el análisis de la autonomía del vehículo eléctrico fue necesario establecer una ruta de ensayo con base en el estudio de los patrones de movilidad y los requisitos del trayecto establecidos en el Reglamento UE 2017/1151. Cabe aclarar que en el presente trabajo no se evalúan emisiones bajo este reglamento, sino únicamente se han tomado en cuenta los lineamientos sobre la conformación de la ruta de ensayo.

3.3.1 REGLAMENTO UE 2017/1151

Los ensayos de conducción reales (RDE) son efectuados en carretera, en contraposición a las pruebas en banco de laboratorio que corresponden a los ensayos tradicionales como el WLTP. La RDE, sus límites y disposiciones han sido puestas en marcha desde septiembre

del 2017 (SERNAUTO, 2017, pág. 13). En la Tabla 3.1 se indican los parámetros establecidos en este Reglamento sobre la conformación de la ruta.

Tabla 3.1 Requisitos del trayecto según el Reglamento 2017/1151 RDE

Parámetros	Requisitos		
	Urbano	Rural	Autopista
Tipo de ruta	Urbano	Rural	Autopista
Composición del recorrido	29 - 44 % de la distancia total del recorrido	23 - 43 % de la distancia total del recorrido	23 - 43 % de la distancia total del recorrido
Velocidad promedio	15 - 40 km/h	60 - 90 km/h	> 90 km/h
Longitud mínima del trayecto	16 km	16 km	16 km
Altura	0 a 700 m s. n. m. con exigencia moderada. Entre 700 a 1 300 m s. n. m. con exigencia extendida. 100 m de diferencia de alturas entre puntos inicial y final.		
Temperatura ambiente	0 a 30 °C con exigencia moderada. -7 a 0 °C y 30 a 35 °C con exigencia extendida.		
Carga	Hasta 90% del peso máximo del vehículo.		
Duración	Entre 90 a 120 minutos.		
Porcentaje de paradas	Del 6 al 30% del total del tiempo del trayecto urbano.		

Fuente: (Reglamento UE 2017/1151, 2017, pág. 116)

De esta manera se conformaron las rutas urbana, rural y de carretera, las cuales tomaron como referencia lo establecido en la Tabla 3.1, omitiendo el parámetro referente a la altitud ya que a nivel local se cuenta con una altura de aproximadamente 2 225 m s. n. m.; así como también el parámetro de la velocidad de trayecto de carretera ya que de acuerdo con el fabricante el vehículo eléctrico es capaz de alcanzar una velocidad máxima de 80 km/h.

Cabe recalcar que la parte urbana de la ruta de ensayo fue basada en las rutas obtenidas tras el estudio de los patrones de movilidad de la ciudad, es decir, esta ruta abarcó a las anteriores.

3.4 SELECCIÓN DEL VEHÍCULO E INSTRUMENTACIÓN

3.4.1 RENAULT TWIZY

El automóvil seleccionado para el estudio fue el Renault Twizy, el cual es un vehículo eléctrico de 4 ruedas con dos asientos en la versión “Technic” y uno solo en la versión “Cargo”, indicándose las especificaciones técnicas en el Anexo II.



Figura 3.3 Renault Twizy Cargo

3.4.2 INSTRUMENTACIÓN

3.4.2.1 Instrumentación para la obtención del ciclo de conducción

De acuerdo con a la revisión bibliográfica sobre las diferentes técnicas de obtención de datos para la conformación del ciclo de conducción, la técnica escogida es la del tipo “On-Board”, es decir, las mediciones son realizadas directamente cuando se ejecuten las pruebas en ruta. Por esta razón, se deberá disponer de un dispositivo denominado datalogger GPS, el cual permite almacenar con gran precisión diferentes parámetros cinemáticos.

El equipo datalogger empleado para las mediciones fue el GL-770 Profesional GNSS, mostrado en la Figura 3.4.



Figura 3.4 Datalogger GPS GL-770
(GL-770 / GL-770M Quick Guide, n.d., pág. 1)

En cuanto al manejo de los datos, el dispositivo permite la exportación de la información en diferentes formatos para posteriormente ser analizados mediante el software TSI LogView, recomendado por el mismo fabricante. Así como también, dispone de compatibilidad con la plataforma Google Maps.

3.4.2.2 Instrumentación para obtener información sobre la autonomía

El levantamiento de información en ruta del vehículo urbano eléctrico se realizó a través del protocolo OBDII, permitiendo el acceso a la información de diversos parámetros medidos en tiempo real.

El scanner automotriz Launch X-431 PRO 3 se utilizó como interfaz de conexión para la lectura y almacenamiento de la información provista por los diferentes módulos del vehículo. El scanner está conformado por una tableta y por un conector de diagnóstico, tal como se indica en la Figura 3.5.



Figura 3.5 Scanner Automotriz Launch X-431 PRO 3
(Launch, 2013, pág. 2)

La tableta cuenta con sistema operativo Android y tiene instalada la aplicación “X 431 PRO” que funciona como interfaz y permite el registro ininterrumpido de datos, los cuales son almacenados en un archivo con extensión .x431 que puede ser leído posteriormente con la misma aplicación.

3.5 LEVANTAMIENTO DE DATOS EN RUTA

3.5.1 CONSIDERACIONES PARA LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

Las pruebas en ruta o también llamados recorridos fueron realizados en días entre semana en un horario de las 8:00 a.m., ya que este corresponde a una hora pico de tráfico en la ciudad, lo que proveerá datos más cercanos al comportamiento respecto a la circulación vehicular en la urbe. Cabe mencionar que debido a la pandemia por la cual atravesaba el país, los centros educativos y ciertas actividades laborales se encontraban en modalidad virtual y por ende, no supusieron un factor determinante en el tráfico de la ciudad.

Antes de realizar el recorrido se deberá realizar una inspección de los neumáticos, niveles de los fluidos, sistemas de seguridad activa y pasiva, elementos de la suspensión y dirección, así como también, los componentes eléctricos del vehículo, a fin de evitar accidentes o posibles problemas en las pruebas. Además, se deberá comprobar que el EV se encuentre cargado al 100%.

La ejecución de la prueba supondrá recorrer por completo la ruta de ensayo de la cual se obtendrá el ciclo de conducción. Por otra parte, el recorrido también contempla la descarga total del paquete de baterías del vehículo eléctrico, es decir, una vez completada la ruta y en caso de que el vehículo aún no se haya descargado completamente, se continuará el recorrido hasta que el vehículo se detenga por la descarga total de la batería, procurando de que esta parada sea en un sitio seguro y se encuentre cerca de un punto de recarga. En caso de haber un atasco grave en la circulación debido a un accidente o cualquier otra eventualidad que ocasione que el vehículo permanezca varios minutos parado de manera imprevista, se procederá a dar por finalizado el recorrido, ya que, si se recolecta esta información, se obtendrán datos alejados de la cotidianeidad.

3.5.2 CONFIGURACIÓN E INSTALACIÓN DE LOS EQUIPOS

3.5.2.1 Datalogger GPS GL-770

Previo al uso del dispositivo se deberá descargar e instalar el software TSI LogView, con el cual se realizó la configuración del dispositivo al seleccionar los parámetros de acuerdo con

los requerimientos de las pruebas, siendo la configuración utilizada para este estudio la que se presenta en la Figura 3.6.

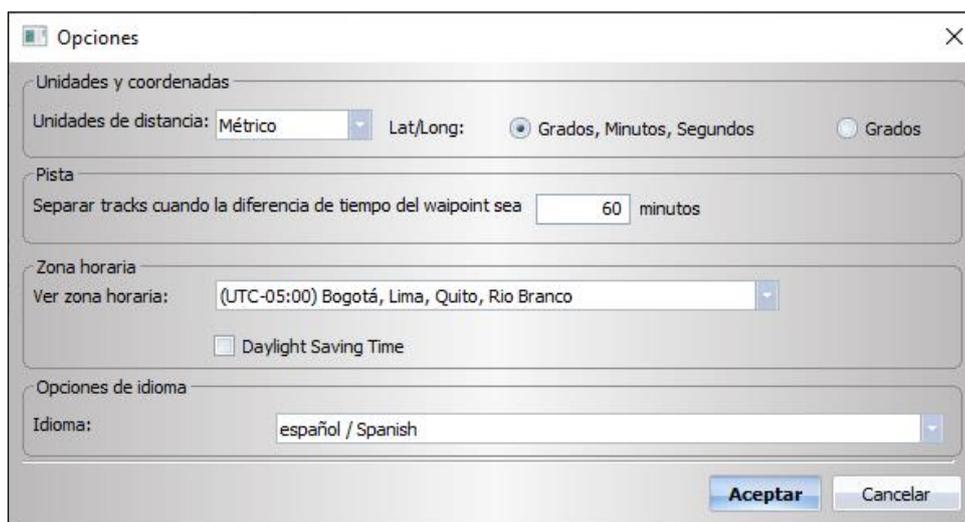


Figura 3.6 Opciones de configuración del software TSI Logview

Una vez realizadas estas configuraciones iniciales, se pudo emplear el dispositivo para el registro de los parámetros que se indican en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Parámetros, unidades y formato de registro del GPS GL-770

Parámetro	Unidades, formato
Índice de grabación	-
Fecha UTC	día/mes/año
Hora UTC	hh/mm/ss
Fecha local	día/mes/año
Hora local	hh/mm/ss
Latitud	grados, minutos, segundos (°, ', '') o decimal
Longitud	grados, minutos, segundos (°, ', '') o decimal
Altitud	metros sobre el nivel del mar (m s. n .m.)
Velocidad	kilómetros por hora (km/h)
Distancia	metros (m)

- **Instalación del GPS en el vehículo**

El módulo GPS deberá estar cargado y ser ubicado en un lugar donde no afecte la recepción de la señal, por esta razón se dispuso el GPS en la puerta del vehículo. De esta manera, no

se interfiere con la señal de recepción y se tendrá al alcance los botones para el registro de eventos y/o ubicaciones.



Figura 3.7 Instalación del datalogger GPS en el vehículo Renault

3.5.2.2 Scanner Launch X-431 PRO3

Es un dispositivo de diagnóstico electrónico automotriz que cuenta con diversas funciones, entre las cuales se destaca la posibilidad de acceder mediante el protocolo OBD II (On Board Diagnostic Second Generation) a datos de funcionamiento en tiempo real del vehículo.

Una vez emparejado el scanner con el vehículo, se procedió a identificar los parámetros en tiempo real a los cuales se podía acceder, indicándose estos a continuación.

- **Componentes de los módulos electrónicos del vehículo**

Para cada sistema se indican determinados parámetros que se pueden monitorear en la sección denominada “Leer componentes”. En la Tabla 3.3 se indican los 40 componentes para el módulo de cuadro de instrumentos y los 13 componentes para el Sistema Controlador de la Batería de Litio (LBC), siendo este último también denominado BMS que se traduce como el sistema de gestión y control del conjunto de baterías recargables para el monitoreo de los parámetros como tensión, energía acumulada, temperatura, etc. que se muestran para conocer el estado de batería en tiempo real.

Tabla 3.3 Componentes de los módulos electrónicos del Renault Twizy

Cuadro de instrumentos	LBC	Airbag
<ol style="list-style-type: none"> 1. + 12 V después de contacto 2. + 12 V luces de posición 3. + Arranque 4. Batería de tracción 5. Carga de batería de tracción 6. Carga de batería de tracción 7. Cierre Relé de tracción no autorizado 8. Código anti-arranque aprendido 9. Después de contacto visto por BCB 10. Energía acumulada durante la carga 11. Estado de Batería 12. Estado LBC visto por BCB (Battery Charger Block) 13. Interbloqueo del BCB 14. Interbloqueo PEB (Power Electronics Block) 15. Intermitentes 16. Kilometraje total de batería de tracción 17. Medida de tensión batería de tracción 18. Motor eléctrico 19. Odometría 20. Ondulador 21. Pedal del freno 22. Posición del pedal del acelerador 23. Potencia instantánea del inversor 24. Potencia máxima autorizada en carga 25. Régimen motor 26. Relé de alimentación del ondulador 27. Relé de potencia del cargador 28. Relé de potencia del ondulador 29. Solicitud de fin de carga 30. Starting authorization 31. Temperatura del motor térmico 32. Tensión de alimentación del calculador 33. Tensión de mando del DC-DC (corriente directa a corriente directa) 34. Testigo de punto muerto 35. Testigo de servicio 36. Testigo de stop 37. Testigo freno aparcamiento 38. Testigo posición D 39. Testigo posición R 40. Toma de 220 V 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Carga de batería de tracción 2. Energía acumulada durante la carga 3. Kilometraje total de batería de tracción 4. Nivel de tensión máximo de la pila 5. Nivel de tensión mínimo de la pila 6. Temperatura de módulo número 1 7. Temperatura de módulo número 2 8. Temperatura de módulo número 3 9. Temperatura de módulo número 4 10. Temperatura de módulo número 5 11. Temperatura de módulo número 6 12. Temperatura de módulo número 7 13. Tensión de batería de tracción 	Sin listado

El módulo de Airbag se presenta sin listado debido a que las funciones en este módulo no son permitidas con el scanner empleado.

- **Selección de componentes**

Los cinco componentes más relevantes para el monitoreo de la descarga de la batería con el vehículo en funcionamiento y a diferentes regímenes de exigencia en rutas preseleccionadas se presentan en la Tabla 3.4, así como también, sus unidades de medición.

Tabla 3.4 Componentes seleccionados para la medición con el scanner

Componente	Unidad
Tensión de batería de tracción	Voltios (V)
Posición del pedal del acelerador	Indicada sin unidades ya que es una medida relativa acorde al porcentaje de desplazamiento angular del pedal. Presenta un valor de 0 cuando no se pisa el pedal y 253 cuando está totalmente accionado.
Potencia instantánea del inversor	Porcentaje (%)
Revoluciones del motor eléctrico	Revoluciones por minuto (rpm)
Temperatura del motor eléctrico	Grados centígrados (°C)

Estos componentes de los módulos electrónicos del vehículo fueron escogidos ya que se basan principalmente en parámetros relacionados con la descarga y consumo de energía de la batería, relacionándose directamente con la autonomía que brinda el EV.

Además, estos parámetros no presentaron un comportamiento estático, permitiendo una variación en tiempo real de los valores de cada uno de estos, a diferencia de otros componentes leídos con el scanner.

Para la medición de los componentes antes mencionados, se realizó un monitoreo en tiempo real mediante el scanner hasta que el EV se descargue por completo. Para lo cual se realiza una grabación de los datos con la función que viene incorporada en la aplicación X 431 PRO, indicándose en la Figura 3.8 la lectura de los componentes en tiempo real a través de esta aplicación.

Nombre	Valor	Unidad
MEDIDA TENSION BATERIA DE TRACCION	57.15	V
POSICION PEDAL ACELERADOR	164	
POTENCIA INSTANTANEA DEL ONDULADOR	5	%
Régimen motor	110	rpm
TEMPERATURA MOTOR TERMICO	32	degree C

Figura 3.8 Lectura de componentes seleccionados mediante la aplicación X 431 PRO

3.6 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN Y CONFORMACIÓN DEL CICLO DE CONDUCCIÓN

3.6.1 PROCESAMIENTO DE LOS REGISTROS DEL DATALOGGER GPS

Mediante la exportación de la información almacenada en la memoria del datalogger GPS a un archivo de valores separados por comas (CSV), se continuó con el procesamiento. El archivo fue ejecutado con el software Microsoft Excel, el cual permitió la visualización de los registros.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
	INDEX	RCR	UTC DATE	UTC TIME	LOCAL DATE	LOCAL TIME	MS	VALID	LATITUDE	N/S	LONGITUDE	E/W	HEIGHT	SPEED	HEADING	Distance	
2	1	T	23/8/2021	13:12:14	23/8/2021	8:12:14	784	SPS	0,359572	N	-78,110383	W	2223	0,167	0	0	
3	2	T	23/8/2021	13:12:15	23/8/2021	8:12:15	784	SPS	0,359573	N	-78,110383	W	2223	0,241	0	0,16	
4	3	T	23/8/2021	13:12:16	23/8/2021	8:12:16	784	SPS	0,359575	N	-78,110383	W	2224	0,185	270	0,16	
5	4	T	23/8/2021	13:12:17	23/8/2021	8:12:17	784	SPS	0,359575	N	-78,110385	W	2224	0,167	0	0,19	
6	5	T	23/8/2021	13:12:18	23/8/2021	8:12:18	784	SPS	0,359577	N	-78,110385	W	2224	0,185	0	0,19	
7	6	T	23/8/2021	13:12:19	23/8/2021	8:12:19	784	SPS	0,359578	N	-78,110385	W	2225	0,167	0	0,21	
8	7	T	23/8/2021	13:12:20	23/8/2021	8:12:20	784	SPS	0,359578	N	-78,110385	W	2225	0,167	315,000564	0	
9	8	T	23/8/2021	13:12:21	23/8/2021	8:12:21	785	SPS	0,35958	N	-78,110387	W	2225	0,185	270	0,27	
10	9	T	23/8/2021	13:12:22	23/8/2021	8:12:22	785	SPS	0,35958	N	-78,110388	W	2226	0,148	0	0,19	
11	10	T	23/8/2021	13:12:23	23/8/2021	8:12:23	785	SPS	0,359582	N	-78,110388	W	2226	0,13	270	0,19	
12	11	T	23/8/2021	13:12:24	23/8/2021	8:12:24	785	SPS	0,359582	N	-78,11039	W	2226	0,185	315,000565	0,21	
13	12	T	23/8/2021	13:12:25	23/8/2021	8:12:25	785	SPS	0,359583	N	-78,110392	W	2227	0,204	0	0,27	
14	13	T	23/8/2021	13:12:26	23/8/2021	8:12:26	785	SPS	0,359583	N	-78,110392	W	2227	0	0	0	
15	14	T	23/8/2021	13:12:27	23/8/2021	8:12:27	785	SPS	0,359583	N	-78,110392	W	2227	0	0	0	
16	15	T	23/8/2021	13:12:28	23/8/2021	8:12:28	785	SPS	0,359583	N	-78,110392	W	2227	0	0	0	
17	16	T	23/8/2021	13:12:29	23/8/2021	8:12:29	785	SPS	0,359583	N	-78,110392	W	2227	0	0	0	
18	17	T	23/8/2021	13:12:30	23/8/2021	8:12:30	784	SPS	0,359583	N	-78,110392	W	2227	0	0	0	
19	18	T	23/8/2021	13:12:31	23/8/2021	8:12:31	784	SPS	0,359583	N	-78,110392	W	2227	0	180	0	
20	19	T	23/8/2021	13:12:32	23/8/2021	8:12:32	784	SPS	0,359577	N	-78,110392	W	2226	0,056	323,130644	0,74	
21	20	T	23/8/2021	13:12:33	23/8/2021	8:12:33	784	SPS	0,359583	N	-78,110397	W	2226	0,167	0	0,93	
22	21	T	23/8/2021	13:12:34	23/8/2021	8:12:34	784	SPS	0,359583	N	-78,110397	W	2226	0	0	0	
23	22	T	23/8/2021	13:12:35	23/8/2021	8:12:35	784	SPS	0,359583	N	-78,110397	W	2226	0	116,565502	0	

Figura 3.9 Registros del módulo GPS ordenados en filas y columnas

3.6.2 PROCESAMIENTO DE LOS REGISTROS DEL SCANNER LAUNCH

Los datos de los componentes seleccionados del módulo denominado “Tablero de instrumentos” se adquirieron en una sola prueba de campo mediante el scanner Launch X 431 a través de la circulación en la ruta de ensayo comprendida por la parte urbana, rural y autopista.

Los parámetros seleccionados fueron registrados por un tiempo total de 2 horas con 19 minutos teniendo una cantidad de 8 208 datos por cada uno de los componentes. Toda esta información se procesó segundo a segundo mediante visualización directa de cada parámetro y su valor para el registro en una hoja de cálculo de Excel. La Figura 3.10 muestra los datos discretizados.

	A	B	C	D	E	F	G	H
	Hora Local	Número del registro	Tiempo transcurrido	Medida tensión batería de tracción (V)	Posición pedal acelerador	Potencia instantánea del inversor (%)	Régimen motor (rpm)	Temperatura motor (°C)
1								
2	8:14:13	0	0:00:00	57,14	0	0	0	29
3	8:14:14	1	0:00:01	57,14	0	0	0	28
4	8:14:15	2	0:00:02	57,14	117	2	30	28
5	8:14:16	3	0:00:03	57,14	146	4	90	28
6	8:14:17	4	0:00:04	57,14	149	6	330	28
7	8:14:18	5	0:00:05	57,14	148	6	280	28
8	8:14:19	6	0:00:06	57,14	149	7	450	29
9	8:14:20	7	0:00:07	57,14	148	9	660	28
10	8:14:21	8	0:00:08	57,14	147	10	800	28
11	8:14:22	9	0:00:09	57,14	149	12	940	28
12	8:14:23	10	0:00:10	57,14	161	16	1180	28
13	8:14:24	11	0:00:11	56,64	161	19	1310	28
14	8:14:25	12	0:00:12	56,64	165	21	1430	28
15	8:14:26	13	0:00:13	56,64	164	23	1630	28
16	8:14:27	14	0:00:14	56,64	165	25	1830	28
17	8:14:28	15	0:00:15	56,64	155	24	1970	28
18	8:14:29	16	0:00:16	56,64	143	20	2080	28
19	8:14:30	17	0:00:17	56,64	142	21	2270	28
20	8:14:31	18	0:00:18	56,64	118	14	2290	28
21	8:14:32	19	0:00:19	57,14	76	5	2230	29

Figura 3.10 Procesamiento de los datos obtenidos con el scanner automatizado

3.6.3 CONFORMACIÓN DEL CICLO DE CONDUCCIÓN

Para la construcción del ciclo de conducción se empleó el método directo, el cual consiste en la obtención de un perfil de velocidades en función del tiempo, el cual está basado en las condiciones reales de circulación de la ruta de ensayo.

Para esto será necesario utilizar el archivo generado por el datalogger GPS, el cual ha sido procesado previamente. Para la elaboración de los perfiles de velocidad de cada una de las

partes que conforman a la ruta de ensayos, se utiliza la herramienta de gráficos de Excel, la cual permite a través de líneas mostrar las variaciones de velocidad en cada segundo, de acuerdo con lo registrado por el GPS.

Por otra parte, se empleó la función “Agregar línea de tendencia”, a fin de que el perfil de velocidades trazado por el programa presente curvas suavizadas a través del cálculo de medias móviles, lo cual se basa en el promedio de los valores previos. De esta manera, se trazaron los ciclos de conducción urbano, rural y de carretera que serán utilizados más adelante para el análisis de la autonomía del vehículo eléctrico.

3.6.3.1 Parámetros del ciclo de conducción

Adicional al trazo de los ciclos de conducción se detallaron ciertos parámetros representativos, los cuales describen de mejor manera los resultados obtenidos y permiten una mejor caracterización del ciclo. Algunos de estos como el tiempo de duración, la velocidad máxima, velocidad promedio y la distancia del recorrido son provistos por el GPS, sin embargo, existen otros que deberán ser calculados. Por esta razón, se muestran a continuación las condiciones y ecuaciones utilizadas para su estimación.

- **Aceleración**

La aceleración representa un cambio de velocidad experimentado en un período de tiempo. De acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI) es expresada en m/s^2 y para calcular esta variable se ha utilizado la Ecuación 3.5.

$$a = \frac{V_f - V_i}{\Delta t} \quad [3.5]$$

Donde:

a : Aceleración instantánea

V_f : Velocidad final

V_i : Velocidad inicial

Δt : Variación del tiempo

Tras el cálculo de la aceleración instantánea experimentada en cada segundo, se procederá a identificar del conjunto de datos los siguientes parámetros:

- Aceleración positiva máxima
- Aceleración promedio positiva

- **Número de paradas**

El número de paradas corresponde a la cantidad de detenciones previstas durante el ciclo de conducción, en este parámetro no se contempla el tiempo, sino únicamente las veces que la velocidad y aceleración del vehículo han sido cero.

- **Tiempo de permanencia en aceleración**

La permanencia en estado de aceleración tendrá lugar cuando el vehículo experimente una aceleración mayor o igual a $0,1 \text{ m/s}^2$ y se tenga una velocidad mayor a 0 km/h .

- **Tiempo de permanencia en desaceleración**

La permanencia en estado de desaceleración sucederá cuando el vehículo experimente una aceleración menor o igual a $-0,1 \text{ m/s}^2$ y se tenga una velocidad mayor a 0 km/h .

- **Tiempo de permanencia en parado**

Se establece como permanencia en parado cuando la velocidad y la aceleración del automóvil son cero, viéndose reflejado este factor cuando el vehículo permanece encendido pero no se desplaza.

- **Tiempo de permanencia en crucero**

La permanencia en crucero ocurre cuando la velocidad del automóvil es mayor a 0 km/h y no se presenta una variación de aceleración (o desaceleración) considerable, estableciéndose el rango de variación de aceleración de $\pm 0,1 \text{ m/s}^2$.

3.6.3.2 Estados de conducción

Los estados de conducción indican el porcentaje de permanencia en parado, velocidad crucero, aceleración y desaceleración del vehículo durante el recorrido, permitiendo una mejor descripción del ciclo de conducción. A continuación, se definen las ecuaciones para cada estado de conducción.

- **Estado de permanencia en aceleración**

El estado de permanencia en aceleración representa en unidades porcentuales el tiempo en el cual el vehículo se ha mantenido en este estado en relación con el tiempo total del recorrido, tal como se establece en la Ecuación 3.6.

$$E_A = \sum_{i=1}^n \frac{T_{Ai}}{T_{Ti}} \times 100\% \quad [3.6]$$

Donde:

E_A : Estado de permanencia en aceleración

T_{Ai} : Tiempo de permanencia en aceleración

T_{Ti} : Tiempo total del recorrido

- **Estado de permanencia en desaceleración**

El estado de permanencia en desaceleración representa en unidades porcentuales el tiempo en el cual el vehículo se ha mantenido en este estado en relación con el tiempo total del recorrido, tal como se establece en la Ecuación 3.7.

$$E_D = \sum_{i=1}^n \frac{T_{Di}}{T_{Ti}} \times 100\% \quad [3.7]$$

Donde:

E_D : Estado de permanencia en desaceleración

T_{Di} : Tiempo de permanencia en desaceleración

T_{Ti} : Tiempo total del recorrido

- **Estado de permanencia en parado**

El estado de permanencia en parado representa en unidades porcentuales el tiempo en el cual el vehículo se ha mantenido en este estado en relación con el tiempo total del recorrido, tal como se establece en la Ecuación 3.8.

$$E_p = \sum_{i=1}^n \frac{T_{Pi}}{T_{Ti}} \times 100\% \quad [3.8]$$

Donde:

E_p : Estado de permanencia en parado

T_{Pi} : Tiempo de permanencia en parado

T_{Ti} : Tiempo total del recorrido

- **Estado de permanencia en crucero**

El estado de permanencia en crucero representa en unidades porcentuales el tiempo en el cual el vehículo se ha mantenido en este estado en relación con el tiempo total del recorrido, tal como se establece en la Ecuación 3.9.

$$E_c = \sum_{i=1}^n \frac{T_{Ci}}{T_{Ti}} \times 100\% \quad [3.9]$$

Donde:

E_c : Estado de permanencia en crucero

T_{Ci} : Tiempo de permanencia en crucero

T_{Ti} : Tiempo total del recorrido

3.7 ANÁLISIS DE LA AUTONOMÍA DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

3.7.1 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS

Para el análisis de la autonomía fue necesaria la formulación de una metodología tomando en cuenta los parámetros registrados y calculados tras la prueba de descarga del EV a través del dispositivo GPS, así como también, los medidos mediante el scanner automotriz, los

cuales fueron: tiempo, altitud, velocidad, aceleración, distancia recorrida, tensión de la batería de tracción, posición del acelerador, potencia instantánea del inversor, régimen de motor eléctrico, temperatura de motor eléctrico.

Además de los parámetros antes descritos, se calcularon otros de gran relevancia para el análisis de la autonomía del EV, los cuales son empleados por el Sistema de Control de la Batería (BMS) para garantizar una adecuada carga y descarga de las baterías y, por ende, el correcto funcionamiento del automóvil. Estos parámetros se muestran a continuación.

3.7.1.1 Estimación del estado de carga en función del voltaje (SOC_v)

Para la estimación del estado de carga en función del voltaje se emplearon los valores de voltaje máximo y mínimo de operación del EV, obtenidos tras las pruebas experimentales. Este SOC representa la cantidad de carga indicada en el tablero de instrumentos del vehículo sirviendo como información para el conductor a fin de que gestione correctamente la descarga del mismo. Cabe recalcar que este estado de carga no es el real ya que siempre se consideran rangos máximos y mínimos de carga y descarga para evitar daños irreparables en la batería. La fórmula se describe de la siguiente manera:

$$SOC_v = \frac{V_a - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}} \times 100\% \quad [3.10]$$

Donde:

SOC_v :	Estado de carga en función del voltaje
V_a :	Voltaje actual medido
V_{\min} :	Voltaje mínimo de operación de la batería
V_{\max} :	Voltaje máximo de operación de la batería

3.7.1.2 Estimación del estado de carga en función de la corriente de descarga (SOC_i)

Para la estimación del estado de carga en función de la corriente de descarga de la batería de Litio-ion se consulta la corriente y potencia de descarga de la batería del EV de acuerdo con las especificaciones del fabricante.

En esta se establece que en un tiempo de 2,6 h o 156 minutos existe una corriente constante de descarga de 50 amperios (Solaris Technology Industry, 2021). Tomando estos valores para la estimación del SOC_i ya que este tiempo se aproxima al de duración de la prueba de ruta total que es de alrededor de 2,5 h.

De esta manera, se calcula el SOC_i mediante la Ecuación 3.11 que relaciona dicha corriente de descarga con la capacidad de la batería (Maldonado & Martínez, 2018, pág. 72).

$$SOC_i = \left(\frac{I * t}{C} * 100\% \right) + SOC_{10\%} \quad [3.11]$$

Donde:

- SOC_i : Estado de carga en función de la corriente de descarga
 I : Corriente de descarga
 t : Tiempo de descarga de la batería
 C : Capacidad de la batería
 SOC_{10%}: Porcentaje conservado de carga

El 10% de conservación de carga se establece en base al 90% de la capacidad de batería utilizable, este aspecto corresponde a un factor de seguridad tanto para carga y descarga con la finalidad de proteger a este componente (*Open Vehicle Monitoring System*, 2019, pág. 12).

3.7.1.3 Autonomía disponible

El cálculo de la autonomía disponible se realizó empleando el estado de carga basado en el voltaje y el valor total de autonomía del EV obtenido tras la prueba experimental, estableciéndose la Ecuación 3.12.

$$A_d = \frac{SOC_v \times A_t}{100\%} \quad [3.12]$$

Donde:

- A_d : Autonomía disponible
 SOC_v: Estado de carga en función del voltaje
 A_t: Valor total de autonomía obtenido tras la prueba experimental

3.7.1.4 Consumo

El consumo energético del vehículo eléctrico tras la prueba de descarga pudo ser cuantificado mediante la Ecuación 3.13.

$$C_{er} = \frac{C}{A_t} \quad [3.13]$$

Donde:

C_{er} : Consumo energético del vehículo eléctrico obtenido bajo condiciones reales

C : Capacidad de la batería

A_t : Valor total de autonomía obtenido tras la prueba experimental

Todos los parámetros fueron almacenados y sincronizados en un solo archivo para poder estudiar el comportamiento del tren de potencia del vehículo eléctrico en función de las condiciones cinemáticas y geográficas de la ruta de ensayo, con el fin de analizar la autonomía en base a la comparación gráfica de esta con los diferentes parámetros, identificándose tasas de cambio, valores máximos y mínimos, pendientes, entre otros aspectos, los cuales permitieron realizar un análisis cuantitativo en función de los tres tipos de rutas. De la misma manera, se buscó contrastar los valores tanto de autonomía como de consumo establecidos por el fabricante con lo medido bajo condiciones reales.

3.8 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA AUTONOMÍA

3.8.1 IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS

Las diferentes variables que serán utilizadas para identificar su correspondiente grado de incidencia sobre la autonomía del EV fueron clasificadas en cuatro grupos: de conducción, geográficos, ambientales y vehiculares.

3.8.1.1 Parámetros de conducción

Las variables que se encuentran en este apartado están relacionadas a la manera de conducir del piloto, la cual está delimitada tanto por las características del conductor (edad, género,

experiencia de conducción, etc.) como del entorno (tipo de vía, velocidad de circulación, tráfico, zona, etc.). De esta manera, de los factores antes mencionados se hizo énfasis principalmente en la velocidad de conducción ya que esta se encuentra ligada directamente con la autonomía puesto que, a mayor velocidad se tendrá un mayor consumo energético debido a la demanda del motor eléctrico para que el automóvil alcance dicha rapidez, disminuyendo la autonomía de este (Yu et al., 2012, pág. 1). Además, este factor supone un criterio relevante para el diseño de los EV.

3.8.1.2 Parámetros geográficos

Las variables que se contemplaron en esta sección son las relacionadas a la pendiente de la ruta y el tipo de vía, explicándose a profundidad cada uno de estos a continuación.

- **Pendiente de la ruta**

La variación de altura en un determinado trayecto puede ser expresada en grados, indicándose la inclinación debida a la relación entre la altura y la longitud de la ruta. Este grado de pendiente incidirá directamente en la potencia necesaria que debe generar el EV para que este se pueda desplazar por el plano inclinado, así como también, en el consumo y por ende, en la autonomía. En la Figura 3.11 se indica el ángulo de la pendiente (α) debido a la variación de altura (h) y la longitud (b).

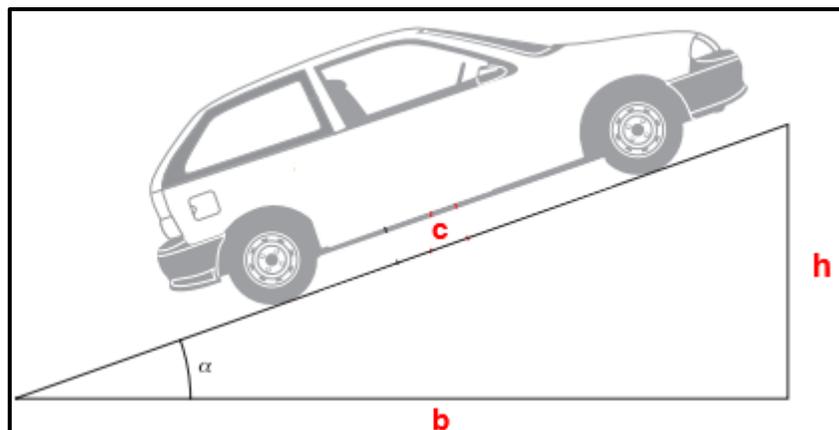


Figura 3.11 Ángulo de la pendiente (α), variación de altura (h), longitud (b) y distancia del recorrido (c)

(García, 2017, pág. 13)

Para el cálculo del ángulo de la pendiente se hace uso de la Ecuación 3.14 y se utiliza la información del perfil de elevación obtenido a través de Google Earth, en el cual se indican los diferentes valores de altura en función de la distancia del trayecto.

$$\alpha = \arctg \frac{h}{b} \quad [3.14]$$

Donde:

- α : Ángulo de pendiente
- h: Variación de altura [m]
- b: Longitud [m]

Por otro lado, para el cálculo de la longitud (b), se utiliza la Ecuación 3.15 ya que el perfil de elevación provee únicamente la distancia del recorrido (c) y la variación de altura (h), siendo esta última la diferencia entre la altura final e inicial del tramo.

$$b = \sqrt{c^2 - h^2} \quad [3.15]$$

Donde:

- b: Longitud [m]
- c: Distancia de recorrido [m]
- h: Variación de altura [m]

- **Tipo de vía**

Dado que el EV escogido para el estudio ha sido diseñado principalmente para su desplazamiento en ciudad, el tipo de calzada en el cual transita influirá en el consumo de energía. Este aumento de consumo es debido a que en lugares rurales las vías no son asfaltadas, haciendo que el coeficiente a la rodadura aumente.

Así como también, existen baches o rompe velocidades en los cuales será necesario frenar considerablemente (a fin de que la suspensión del EV no se estropee) e iniciar nuevamente la aceleración. Por otro lado, según sea la vía de tipo rural, urbana o de carretera se tendrán

diferentes velocidades de circulación causadas por el tránsito, estado de la vía y los límites de velocidad permitidos.

3.8.1.3 Parámetros ambientales

La temperatura del medio en donde el vehículo eléctrico se encuentre funcionando es de gran relevancia debido a que su influencia en el rendimiento de las baterías del vehículo puede resultar propicio o lo contrario, por ejemplo, a temperaturas por debajo de los 10 °C y por encima de los 30 °C se tienen pérdidas de rendimiento del 20-30% en las baterías, lo que se verá evidenciado en una disminución de la autonomía (Argue, 2020). Por lo tanto al mantener una temperatura adecuada de funcionamiento de las mismas se puede lograr un buen aprovechamiento su energía acumulada.

Por otra parte, la humedad del medio en donde se encuentre también afectará el desempeño de estas. Estos problemas de rendimiento se deben a que el paquete de baterías que el EV incorpora funciona de mejor manera a temperaturas normales (10-30 °C). Por este motivo en el diseño de este tipo de vehículos se toma muy en cuenta el sistema de enfriamiento y/o calefacción de estas.

Cabe mencionar que en la ciudad de Ibarra se tiene un clima seco templado con temperaturas que varían de los 13 °C a 24 °C a lo largo del año (Dirección de Planificación y Desarrollo Territorial, 2020, pág. 23), lo que supondrá una baja influencia en el rendimiento y autonomía del EV debido a este factor.

3.8.1.4 Parámetros vehiculares

En este apartado se hace referencia a las especificaciones técnicas del vehículo eléctrico, las cuales permitirán dimensionar más adelante la potencia, el consumo y la autonomía mediante el análisis de los elementos correspondientes a la dinámica vehicular.

En la Tabla 3.5 se enlistan las especificaciones técnicas del tren de potencia y la carrocería del Renault Twizy.

Tabla 3.5 Especificaciones técnicas del EV

Componente	Descripción	Valor	
Batería de tracción	Voltaje nominal	58V	
	Capacidad	6,1 kWh \approx 130 Ah	
	Peso	98 kg	
	Dimensiones	0,828 m \times 0,478 m \times 0,233 m	
	Densidad de energía	66,15 kWh/m ³	
	Energía específica	62,24 Wh/kg	
Motor	Potencia máxima	13 kW	
	Par máximo	57 Nm	
	Eficiencia	83 %	
Transmisión	Relación de transmisión	9,23:1	
	Eficiencia	96 %	
Carrocería	Coeficiente aerodinámico (Cx)		0,64
	Dimensiones	Largo	2,338 m
		Ancho	1,454 m
		Alto	1,381 m
	Área frontal		1,472 m ²
Peso total		690 kg	

Fuente: (Renault, 2018, pág. 7)

Además de los parámetros mostrados en la tabla anterior, el estado de carga (SOC) y estado de salud (SOH) del paquete de baterías corresponden a parámetros influyentes en la autonomía al cuantificar el nivel de carga y la degradación de este elemento, respectivamente; siendo indicadores esenciales en el Sistema de Control de la Batería (BMS) presente en los EV.

3.8.2 EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS EN LA AUTONOMÍA

Para evaluar los parámetros definidos anteriormente se utilizaron los criterios para el dimensionamiento de trenes de potencia, los cuales se basan en el estudio de la dinámica vehicular. Mediante esta metodología se busca estimar el consumo energético debido a las diferentes variables inmersas, identificándose aquellas que ocasionan un mayor consumo de

energía y por ende, influirán negativamente en la autonomía del EV. La dinámica vehicular en un principio cuantifica las fuerzas de resistencia al movimiento del vehículo, las cuales son de tipo: aerodinámica, por rodadura y por pendiente.

3.8.2.1 Resistencia aerodinámica

Esta fuerza de resistencia es debida a la acción del aire por lo que depende en gran medida del tamaño y la forma del automóvil, los cuales a su vez, establecen el coeficiente aerodinámico de dicho vehículo. En la Ecuación 3.16 se indican todos los aspectos que determinan la magnitud de la fuerza de resistencia aerodinámica.

$$F_A = \frac{1}{2} * C_x * A * \rho * v^2 \quad [3.16]$$

Donde:

- F_A : Resistencia aerodinámica [N]
- C_x : Coeficiente de resistencia al aire del vehículo
- A : Área frontal del vehículo [m²]
- ρ : Densidad del aire [kg/m³]
- v : Velocidad [m/s]

El área frontal del vehículo fue tomada en base a las especificaciones mostradas en la Tabla 3.5, mientras que para el cálculo de la densidad del aire en un determinado lugar se hizo uso de la versión simplificada de la fórmula CIPM 2007, la cual es la recomendada por el Comité Internacional de Pesas y Medidas (Manuel et al., 2010, pág. 3).

$$\rho_a = \frac{0,348444p - h_r(0,0025t - 0,020582)}{273,15 + t} \quad [3.17]$$

Donde:

- ρ_a : Densidad del aire [kg/m³]
- p : Presión barométrica [hPa]
- h_r : Humedad relativa del aire [%]
- t : Temperatura del aire [°C]

De esta manera, se calculó esta fuerza de resistencia variando las velocidades de circulación, desde los 0 km/h hasta los 80 km/h, siendo esta última, la velocidad máxima establecida por el fabricante del vehículo.

3.8.2.2 Resistencia por rodadura

La resistencia a la rodadura es generada por la deformación que existe en el neumático o la superficie debido a la presión existente en el área de contacto entre estos dos (García, 2017, pág. 11). Esta resistencia expresa la magnitud que deberá ser vencida para que las llantas rueden sobre la superficie, indicándose en la Ecuación 3.18 como determinarla.

$$F_{Ro} = m * g * \mu_{ro} \quad [3.18]$$

Donde:

- F_{Ro} : Resistencia por rodadura [N]
- m : Masa neta del vehículo [kg]
- g : Valor de aceleración de la gravedad [m/s^2]
- μ_{ro} : Coeficiente de resistencia a la rodadura

Como es de intuir, la resistencia por rodadura es independiente de la velocidad de circulación, por lo cual para estimar la incidencia de los parámetros que la componen se supondrá un caso hipotético en el cual se cambiase el paquete de baterías que el vehículo incorpora de fábrica por otro utilizado en el sector automotriz de mayores prestaciones debido a su tecnología.

El paquete de baterías empleado para este caso hipotético fue el del Tesla Model S, conformado por celdas modelo 18650 las cuales agrupadas forman un total de 16 módulos y una capacidad de 85 kWh.

En la Tabla 3.6 se detallan las especificaciones sobre el material, voltaje, capacidad, peso y dimensiones un solo módulo de este paquete de baterías.

Tabla 3.6 Especificaciones del módulo de baterías del Tesla Model S

Especificación	Descripción
Material	Li-ion
Voltaje máximo	25,2 V
Voltaje mínimo	18 V
Voltaje nominal	22,8 V
Capacidad	5,3 kWh
Peso	25 kg (55 lb)
Dimensiones	0,686 m×0,292 m×0,089 m
Energía específica	212 Wh/kg
Densidad de energía	297,29 kWh/m ³

Fuente: (Tesla battery Module Controller, 2017, pág. 13)

De acuerdo con las especificaciones previamente mostradas, se podrían montar dos de estos módulos en el EV sin comprometer el peso ni el espacio destinado para este componente. Teniéndose en esta configuración una capacidad de 10,6 kWh y un peso de 50 kg.

De esta manera, para el primer caso con el paquete de baterías original, el peso total del vehículo incluido con el del conductor (70 kg) es de 760 kg, mientras que para el caso hipotético se tendrá un peso de 712 kg, viéndose reflejada esta disminución en el peso debido al nuevo paquete de baterías.

El coeficiente de resistencia a la rodadura es un valor adimensional el cual está relacionado a la deformación de los cuerpos en contacto. Generalmente para vehículos livianos de baja resistencia que se desplazan sobre asfalto se suelen tomar valores comprendidos entre 0,006 a 0,01 (Marchese & Golato, 2011), tomándose para el análisis el valor más alto de 0,01 puesto que no se encontró información específica de los neumáticos usados por el EV.

3.8.2.3 Resistencia por pendiente

Esta fuerza debida a la inclinación del terreno se produce por la oposición de una componente del peso del vehículo y es aplicada en el centro de gravedad de este. La resistencia por pendiente es obtenida través de la Ecuación 3.19.

$$F_p = m * g * \text{sen} (\alpha) \quad [3.19]$$

Donde:

- F_p : Resistencia por pendiente [N]
 m : Masa neta del vehículo [kg]
 g : Valor de aceleración de la gravedad [m/s^2]
 α : Ángulo de la pendiente

De igual manera que el caso anterior, se consideró el supuesto caso de cambiar el paquete de baterías descrito anteriormente, a fin de poder analizar la incidencia de este factor en la resistencia por pendiente. Por otro lado, el ángulo de pendiente se obtendrá mediante la Ecuación 3.14 y la Ecuación 3.15 expuestas con anterioridad y representando la variación de altura en el tramo escogido de la ruta en la ciudad de Ibarra.

3.8.2.4 Potencia

La potencia requerida para vencer cada una de las fuerzas de resistencia definidas anteriormente será calculada mediante la multiplicación de estas por la velocidad de circulación. De esta manera, la potencia para vencer la resistencia aerodinámica se encuentra definida por la Ecuación 3.20.

$$P_A = F_A * v \quad [3.20]$$

Donde:

- P_A : Potencia requerida para vencer la resistencia aerodinámica [W]
 F_A : Resistencia aerodinámica [N]
 v : Velocidad [m/s]

La potencia debida a la resistencia por rodadura es establecida por la Ecuación 3.21.

$$P_{Ro} = F_{Ro} * v \quad [3.21]$$

Donde:

- P_{Ro} : Potencia requerida para vencer la resistencia por rodadura [W]
 F_{Ro} : Resistencia por rodadura [N]
 v : Velocidad [m/s]

La potencia requerida para vencer la resistencia por pendiente es determinada por la Ecuación 3.22.

$$P_p = F_p * v \quad [3.22]$$

Donde:

P_p : Potencia requerida para vencer la resistencia por pendiente [W]

F_p : Resistencia por pendiente [N]

v : Velocidad [m/s]

Una vez calculados estos valores, se estimó la potencia del motor, la cual indica la potencia mínima que deberá generar el motor eléctrico para el desplazamiento del automóvil.

$$P_{\text{motor}} = \frac{P_A + P_{R0} + P_p}{\eta_{\text{transmisión}}} \quad [3.23]$$

Donde:

P_{motor} : Potencia del motor requerida para vencer las fuerzas de resistencia [W]

P_A : Potencia requerida para vencer la resistencia aerodinámica [W]

P_{R0} : Potencia requerida para vencer la resistencia por rodadura [W]

P_p : Potencia requerida para vencer la resistencia por pendiente [W]

$\eta_{\text{transmisión}}$: Eficiencia de la transmisión [%]

Cabe mencionar que para el caso del Renault Twizy se tiene que la eficiencia de la transmisión se sitúa en un 96% según datos del fabricante.

3.8.2.5 Consumo

El consumo permite definir la tasa de energía gastada para impulsar el vehículo en función de la distancia. Como es de suponer, un alto consumo originará una disminución en la autonomía del EV, ya que se estará gastando más energía de la capacidad total de la batería. La Ecuación 3.24 permite la determinación del consumo energético del EV.

$$C_e = \frac{P_{\text{motor}} * \Delta t}{\eta_{\text{motor}} * d} \quad [3.24]$$

Donde:

C_e :	Consumo de energía [Wh/km]
P_{motor} :	Potencia del motor requerida para vencer las fuerzas de resistencia [W]
Δt :	Variación del tiempo [h]
η_{motor} :	Eficiencia del motor eléctrico
d :	Distancia del recorrido [km]

3.8.2.6 Autonomía

El rango de autonomía del EV puede ser dimensionado en función del consumo energético debido a los diferentes parámetros que intervienen en las ecuaciones previamente definidas y la capacidad del paquete de baterías, obteniéndose resultados que permitan predecir el comportamiento del vehículo respecto a la autonomía y se consiga identificar aquellos parámetros de mayor incidencia sobre esta. En este sentido, la Ecuación 3.25 se utilizó para la determinación de la autonomía del EV.

$$A = \frac{C_b * SOC_{m\acute{a}x.}}{C_e} \quad [3.25]$$

Donde:

A :	Autonomía
C_b :	Capacidad de la batería [Wh]
$SOC_{m\acute{a}x.}$:	Estado de carga máximo que permite el EV [%]
C_e :	Consumo de energía [Wh/km]

Según las especificaciones de la batería y a fin de que se contemple un factor de seguridad para evitar daños en este componente, se consideró un estado de carga máximo del 90% para la estimación de la autonomía.

De acuerdo con lo antes expuesto, para la evaluación del grado de influencia de los parámetros mediante el estudio de la dinámica vehicular, se utilizará información asentada a la realidad del entorno y del EV, a fin de poder analizar e identificar las variables más relevantes que podrían considerarse para mejorar la autonomía, así como también, la profundización en consideraciones de diseño.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 DEFINICIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LA AUTONOMÍA

De acuerdo con los diferentes apartados desarrollados en el capítulo anterior, en la Figura 4.1 se define la serie de pasos llevados a cabo en el actual estudio que tuvo como finalidad el analizar la autonomía de la batería de un vehículo urbano eléctrico.

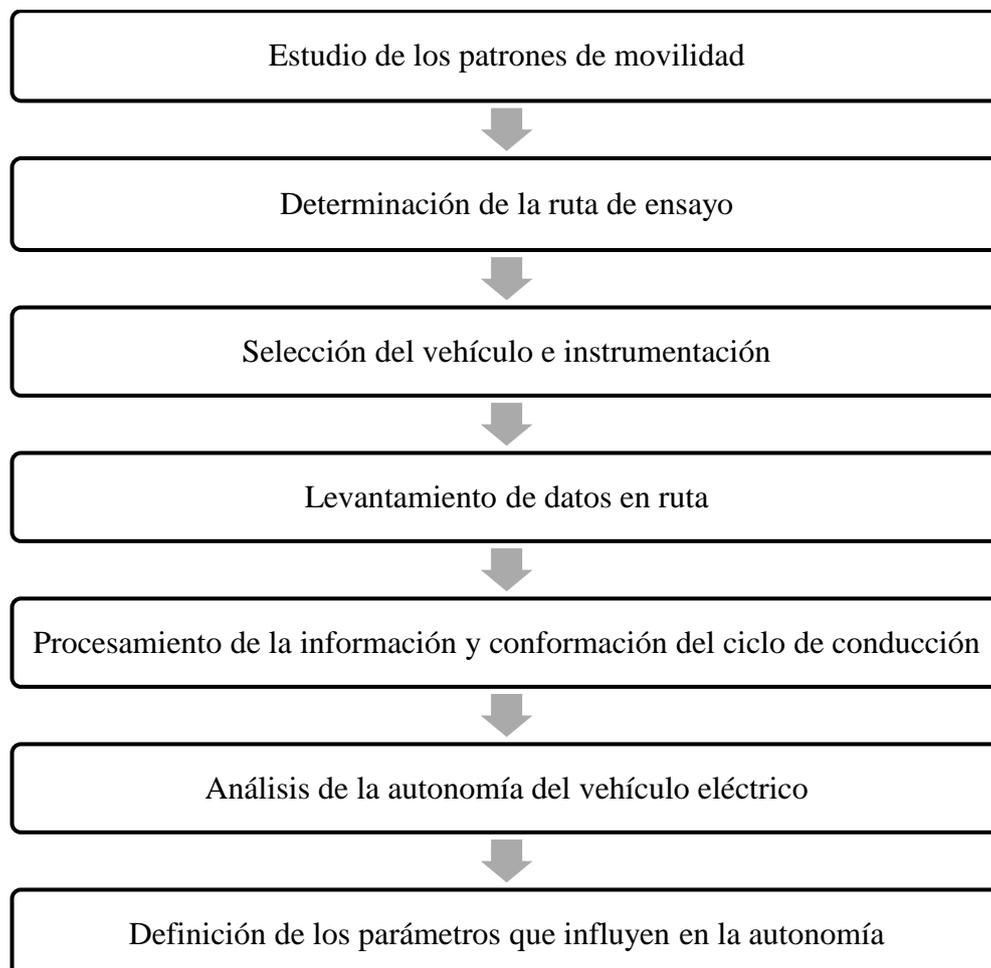


Figura 4.1 Metodología definida para el análisis de la autonomía de un EV

La serie de pasos descritos anteriormente han permitido un desarrollo organizado del trabajo de grado al mismo tiempo que se cumplieron los objetivos propuestos. Por esta razón, puede ser utilizada en trabajos posteriores relacionados a esta temática.

4.2 ESTUDIO DE LOS PATRONES DE MOVILIDAD

4.2.1 DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.2.1.1 Cantón Ibarra

San Miguel de Ibarra, capital de la provincia de Imbabura está ubicada a 115 km al Noreste de Quito y se encuentra a una altitud de 2225 m.s.n.m. Limita al norte con la provincia del Carchi, al sur con la provincia de Pichincha, al lado noroeste con la provincia de Esmeraldas y al oeste con los cantones Otavalo, Urcuquí y Antonio Ante (Dirección de Planificación y Desarrollo Territorial, 2020, pág. 13)

El cantón Ibarra tiene una población de 181 175 habitantes que representa el 39,9% de la población total de la provincia de Imbabura y cuenta con una densidad poblacional de 165,77 habitantes/km² (INEC, 2010, pág. 8).

- **División política del cantón**

El cantón Ibarra se encuentra conformado por 5 parroquias urbanas y 7 parroquias rurales, las cuales se enlistan a continuación.

Parroquias urbanas:

- San Francisco
- El Sagrario
- Caranqui
- Alpachaca
- Priorato

Parroquias rurales:

Tabla 4.1 Parroquias y barrios del cantón Ibarra

Tipo	No.	Parroquia	Barrios
Rural	1	Angochagua	Zuleta, La Rinconada, Conchas, El Chilco
	2	San Antonio	Bellavista, Tanguarín, La Compañía, Santo Domingo
	3	Lita	El Carmen, La Esperanza de Río Verde, Río Verde Bajo, Santa Cecilia
	4	La Carolina	Inviola, Cuajara, Luz de América, Urbina
	5	Salinas	Salinas, Cuambo, San Luis de Salinas, Salinas Núcleo Urbano
	6	Ambuquí	El Chota, Peñaherrera, Flores Chilcapamba, Carpuela
	7	La Esperanza	Comuna Paniquindra, La Esperanza, Chirihuasi, Comuna La Florida
Urbano	8	Guayaquil de Alpachaca	Vista Lago, Buenos Aires, Mirador de Alpachaca, Parque Industrial
	9	Caranqui	Naranjito, Catzoloma, San Francisco de Chorlavisito, La Candelaria
	10	Sagrario	San Miguel Arcángel, Ciudad de Ibarra, Ajaví Grande, San Miguel de Ibarra, Huertos Familiares, Pugacho bajo
	11	San Francisco	El Tejar, La Bola Amarilla, La Campiña, Los Ceibos, Pugacho Alto, Yacucalle
	12	La Dolorosa de Priorato	Cuatro Esquinas, Flor del Valle, La Delicia, Socapamba

Fuente: (Dirección de Planificación y Desarrollo Territorial, 2020, pág. 225)

- **Atractores de viaje**

Después de analizar la división del cantón en parroquias y barrios, a continuación se definen los tipos de centros de atracción de viaje, los cuales más adelante facilitarán la delimitación de las zonas sujetas a la generación y atracción de los desplazamientos de usuarios de la red vial urbana. (Plan de Movilidad Sustentable del cantón Ibarra, 2015, pág. 692). Como tipos de centros de atracción de viaje se definen:

- Centros comerciales
- Cementerios
- Centros de salud
- Establecimientos educativos
- Establecimientos financieros
- Estadios

- Instituciones del estado
- Mercados
- Parques e iglesias

- **Determinación de sectores**

Tomando en cuenta los centros de atracción de viaje y que el sector urbano del cantón está formado por las 5 parroquias descritas en la Tabla 4.1, se realiza una subdivisión de las parroquias urbanas en más sectores, llegando a delimitar un total de 19 zonas para el estudio actual.

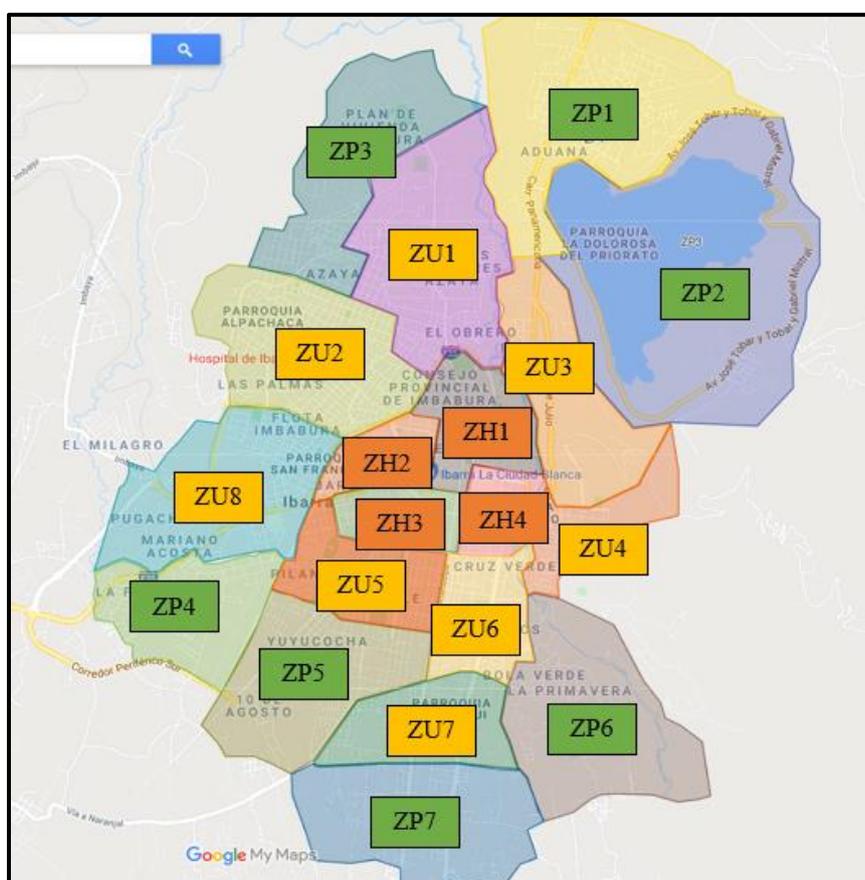


Figura 4.3 Zonificación del área urbana del cantón Ibarra
(Google Maps, 2021)

- **Clasificación de los sectores**

Las zonas resultantes se dividen en zonas urbanas perimetrales (ZP), zonas urbanas centrales (ZU) y zonas urbanas de hipercentro (ZH) en función de la cercanía al hipercentro de la ciudad, el cual representa una zona compleja que contiene al conjunto de áreas donde se combina una gran cantidad de distintas actividades comerciales, laborales, de ocio y gestión.

En la Tabla 4.2 se presenta la información de las 19 zonas obtenidas con sus respectivos centros de atracción de viaje, los cuales han sido tomados del Plan de Movilidad Sustentable del cantón.

Tabla 4.2 Identificación de las zonas delimitadas del área urbana

No.	Zona	Parroquias	Sector	Atractores
1	ZU1	La Dolorosa de Priorato	Huertos Familiares Azaya	Estadio UTN ITCA Colegio N. Yahuarchocha Colegio Universitario UTN MIES Policía Judicial
2	ZU2	Alpachaca-San Francisco	Alpachaca, Las Palmas, Ajaví	Hospital del Seguro IESS Ibarra UE 17 de Julio UE Juan Pablo II Unidad Educativa Ciudad de Ibarra Parque Infantil Azaya Parque Alpachaca Parque El Jardín Parque Héroes UTPL Ibarra
3	ZU3	La Dolorosa de Priorato-Sagrario	El Olivo, San Miguel Arcángel	Mirador del Arcángel PUCE-SI UTN Gasolinera Los Olivos UE Fátima UE Arrayanes
4	ZU4	Sagrario	La Victoria	Parque Lineal La Victoria UE Víctor Manuel Peñaherrera Parque Iglesia La Victoria
5	ZU5	Sagrario-San Francisco-Caranqui	Yacucalle, Pílanquí	Escuela Juan Diego Colegio Nikolas Tesla Parque La Familia Parque del Agua Parque Pílanquí Gasolinera Jerusalén
6	ZU6	Sagrario - Caranqui	Cruz Verde, Los Ceibos	UE Víctor Manuel Guzmán UE Teodoro Gómez de la Torre Academia Victoria Bilingüe Parque de la Niñez Cementerio San Miguel

Tabla 4.2 Identificación de las zonas delimitadas del área urbana (**continuación...**)

No.	Zona	Parroquias	Sector	Atractores
7	ZU7	Caranqui	Zona Norte de la parroquia Caranqui	UE Atahualpa UE Madre Teresa Bacq Parque Atahualpa Estadio Caranqui Iglesia Monasterio Caranqui
8	ZU8	San Francisco	Cananvalle, Colinas del Sur, Ejido de Ibarra	Parque Ciudad Blanca C.C. La Plaza UE Mariano Suárez de Veintimilla UE Pensionado Atahualpa ANT Centro de RTV Centro de Salud Pugacho Gasolinera Primax
9	ZH1	San Francisco	Sector La Merced, Consejo Provincia de Imbabura	Mercado Sto. Domingo Parque Pedro Moncayo Parque La Merced Centro de Salud N.º 1 Estadio Olímpico Registro Civil
10	ZH2	San Francisco	Sector de las Avenidas: Fray Vacas Galindo, Av. Jaime Rivadeneira	C.C. Laguna Mall Hospital San Vicente de Paúl Coliseo Luis L. Franco Ministerio de Relaciones Laborales
11	ZH3	Sagrario	Sector Estación del Ferrocarril	Mercado Amazonas Supermercado TIA Estación del Ferrocarril Parque Germán Grijalva Banco del Pichincha Agencia de regulación y control minero (ARCOM) Servicio ecuatoriano de capacitación profesional (SECAP)
12	ZH4	Sagrario	Sector Central de Parroquia Sagrario	UE Oviedo UE San Francisco UNIANDES Parque de la Cometa Condominios y conjuntos habitacionales

Tabla 4.2 Identificación de las zonas delimitadas del área urbana (**continuación...**)

No.	Zona	Parroquias	Sector	Atractores
13	ZP1	La Dolorosa de Priorato	Sector Priorato, Aduana	Colegio Los Álamos UE Selena Chuquizán UE Liceo Aduanero Sub Centro de Salud Priorato Gasolinera Yahuarcocha UE inicial 28 de Septiembre
14	ZP2	La Dolorosa de Priorato	Sector Yahuarcocha	Laguna de Yahuarcocha Autódromo Internacional Pista de Motocross Zonas de Camping Comedores y alojamientos
15	ZP3	Alpachaca - La Dolorosa de Priorato	Plan de Vivienda Imbabura, Coop. De Vivienda Buenos Aires, Azaya	Parque del Recuerdo Conjunto Residencial La Foret Conjunto Residencial INNOVA Centro Médico Juan P. II
16	ZP4	San Francisco	La Florida, Rosa Paredes	Hospital Clínica Metropolitana Parque Ciudad Blanca Estadio Liga Jesús del Gran Poder ECU 911 Concesionarios de vehículos
17	ZP5	Caranqui	10 de Agosto, Yuyucocha	Estación de Bomberos Yacucalle Granja Yuyucocha UTN UE Agustín Cueva Dávila
18	ZP6	Caranqui	La Campiña, La Primavera, Bola Verde	UE Particular La Colina Estadio Pablo Jurado Centro de Salud El Tejar Parque Casita de Ibarra
19	ZP7	Caranqui	Sector sur de la parroquia Caranqui	Sector Polideportivo de Caranqui Academia Militar San Diego Sub Centro de Caranqui Estadio Ecovida Polideportivo de Caranqui Parque de Caranqui

Fuente: (Plan de Movilidad Sustentable Del Cantón Ibarra, 2015, pág. 692)

De esta manera se realizó la división de la parte urbana del cantón en función de las parroquias, barrios y atractores de viaje de la ciudad, de acuerdo con lo establecido en el PDOT y el Plan de Movilidad Sustentable del cantón Ibarra.

Esta zonificación permitirá cuantificar de mejor manera el flujo de viajes producidos en la urbe ya que se indican sectores correctamente delimitados para la generación y atracción de viajes.

4.2.2 MÉTODO DE 4 ETAPAS

4.2.2.1 Etapa 1. Generación y atracción de viajes

- **Población**

Como se ha mencionado en el capítulo anterior, la población objeto de estudio será la comprendida por las 5 parroquias urbanas del cantón, siendo estas: El Sagrario, San Francisco, Caranqui, Alpachaca y La Dolorosa de Priorato.

De acuerdo con el Plan de Desarrollo Y Ordenamiento Territorial de Ibarra se estima que los habitantes del sector urbano del cantón para el año 2021 sean de 173 953, cifra que será tomada como población para el actual estudio. En la Tabla 4.3 se detalla el número de habitantes de la parte urbana y parroquias rurales de Ibarra.

Tabla 4.3 Proyección poblacional cantón Ibarra 2021

Parroquias	Número de habitantes
Ibarra (sector urbano)	173 953
Ambuquí	6 818
Angochagua	4 063
Carolina	3 410
La Esperanza	9 168
Lita	4 170
Salinas	2 167
San Antonio	21 815
TOTAL	225 563

Fuente: (Dirección de Planificación y Desarrollo Territorial, 2020, pág. 36)

- **Muestra**

De acuerdo con lo establecido en el capítulo anterior, la muestra se obtiene través de la Ecuación 3.2, la misma que se presenta a continuación además del subsiguiente cálculo del tamaño de muestra para la población antes definida.

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot q}{e^2 \cdot (N - 1) + Z^2 \cdot p \cdot q} \quad [3.2]$$

Donde:

- n: Tamaño de la muestra
- Z: Nivel de confianza
- p: Probabilidad de obtener un resultado exitoso
- q: Probabilidad de obtener un resultado fallido
- N: Población
- e: Margen de error muestral

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot q}{e^2 \cdot (N - 1) + Z^2 \cdot p \cdot q}$$

$$n = \frac{173\,953 \cdot 1,96^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{[(0,05^2) \cdot (173\,953 - 1)] + (1,96^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5)}$$

$$n = \frac{167\,064,461}{(0,0025 \cdot 173\,952) + 0,9604}$$

$$n = \frac{167\,064,461}{434,88 + 0,960}$$

$$\frac{167\,064,461}{435,840}$$

$$n = 383,32$$

$$n = 384$$

La encuesta debe ser aplicada a 384 personas que residan en la parte urbana del cantón Ibarra, a fin de obtener resultados confiables, en los cuales se contemple un margen de error (e) del 5% y un nivel de confianza (Z) del 95%.

- **Resultados de la encuesta**

Una vez aplicada la encuesta a la muestra establecida, se continúa con el desarrollo del primer paso del método de cuatro etapas, en el cual se indica la cantidad de viajes generados y atraídos por cada una de las zonas. La Tabla 4.4 presenta la información obtenida tras la aplicación de la encuesta respecto a la generación y atracción de viajes.

Tabla 4.4 Número de viajes generados y atraídos por cada zona

No.	Zona	Viajes generados por la zona	Viajes atraídos por la zona
1	ZU1	156	130
2	ZU2	105	111
3	ZU3	182	199
4	ZU4	108	127
5	ZU5	59	104
6	ZU6	94	81
7	ZU7	135	45
8	ZU8	66	89
9	ZH1	39	61
10	ZH2	120	182
11	ZH3	83	124
12	ZH4	41	45
13	ZP1	54	50
14	ZP2	60	78
15	ZP3	67	61
16	ZP4	130	79
17	ZP5	98	51
18	ZP6	53	36
19	ZP7	37	34
Total		1687	1687

A continuación en la Tabla 4.5 se detallan los viajes realizados entre semana, fines de semana y en los últimos 7 días, dependiendo de las respuestas del encuestado y en función de las veces que sucedieron; a fin de corroborar el número total de viajes.

Tabla 4.5 Frecuencia de viajes realizados

	1 vez	2 veces	3 veces	4 veces	5 veces	6 veces	7 o más
Entre semana	107	66	62	81	84	0	0
Fin de semana	97	99	0	0	0	0	0
Últimos 7 días	26	21	9	4	6	2	10
N.º veces	230	186	71	85	90	2	10
Viajes	230	372	213	340	450	12	70
Total viajes	1687						

La totalidad de viajes realizados equivalen a 1687, lo que coincide con la suma de los viajes generados y atraídos por todas las zonas, por lo cual se establece que:

$$O_i = D_j \quad [3.1]$$

O_i: Viajes resultantes que se originan en la zona i

D_j: Viajes resultantes captados por la zona j

$$O_i = D_j$$

$$230 + 372 + 213 + 340 + 450 + 12 + 70 = 1687$$

$$1687 = 1687$$

4.2.2.2 Etapa 2. Distribución de viajes

La zonificación del área urbana del cantón Ibarra se puede evidenciar en la Tabla 4.2, indicándose las parroquias, sectores y atractores de viaje de cada una, obteniendo un total de 19 zonas referenciadas como urbanas (ZU), de hipercentro (ZH) y perimetrales (ZP). Cabe hacer esta mención ya que en la Tabla 4.6 se presenta la conformación de la Matriz origen destino de la ciudad de Ibarra, en la cual se define el flujo de viajes que presenta cada una de las zonas delimitadas

Tabla 4.6 Matriz origen-destino de la ciudad de Ibarra

i/j	ZU1	ZU2	ZU3	ZU4	ZU5	ZU6	ZU7	ZU8	ZH1	ZH2	ZH3	ZH4	ZP1	ZP2	ZP3	ZP4	ZP5	ZP6	ZP7	Total (O _i)
ZU1	29	10	12	21	20	3	0	5	11	14	11	7	0	3	0	0	4	0	6	156
ZU2	6	3	23	15	2	10	0	8	0	6	8	0	4	2	11	1	3	2	1	105
ZU3	16	21	34	16	16	5	0	7	0	8	19	2	5	10	0	12	6	0	5	182
ZU4	7	9	11	22	21	0	4	6	0	9	2	4	0	5	1	6	0	1	0	108
ZU5	0	13	3	6	6	0	2	0	1	0	0	6	0	11	10	0	0	0	1	59
ZU6	2	3	8	3	4	3	6	8	5	30	11	0	0	0	5	2	3	0	1	94
ZU7	5	6	7	2	7	8	5	18	8	21	20	6	6	5	5	2	2	0	2	135
ZU8	4	0	9	8	5	3	4	12	3	1	0	2	0	2	0	9	1	2	1	66
ZH1	7	0	7	0	0	1	0	6	2	0	2	0	4	5	0	1	0	0	4	39
ZH2	11	0	17	1	0	22	4	0	0	37	3	1	3	0	3	14	0	4	0	120
ZH3	2	6	13	2	6	0	0	7	1	20	10	4	0	0	0	8	1	2	1	83
ZH4	5	3	2	3	0	9	0	0	4	2	0	2	4	2	0	5	0	0	0	41
ZP1	2	4	6	0	0	0	5	2	5	6	8	0	0	4	5	0	0	5	2	54
ZP2	8	4	6	0	5	0	5	2	4	4	1	0	2	12	0	0	0	6	1	60
ZP3	3	13	9	6	4	5	0	1	0	2	5	5	4	0	2	0	4	0	4	67
ZP4	6	7	13	10	1	10	6	3	5	9	9	0	12	9	13	9	1	7	0	130
ZP5	4	7	15	3	2	1	2	3	2	6	3	4	6	7	4	8	12	5	4	98
ZP6	7	0	3	7	5	1	2	0	0	3	5	0	0	1	2	2	12	2	1	53
ZP7	6	2	1	2	0	0	0	1	10	4	7	2	0	0	0	0	2	0	0	37
Total (D _j)	130	111	199	127	104	81	45	89	61	182	124	45	50	78	61	79	51	36	34	1687

Por otro lado, en la Figura 4.4 se muestra de manera gráfica la matriz origen-destino, indicándose la cantidad de viajes entre cada una de las zonas.

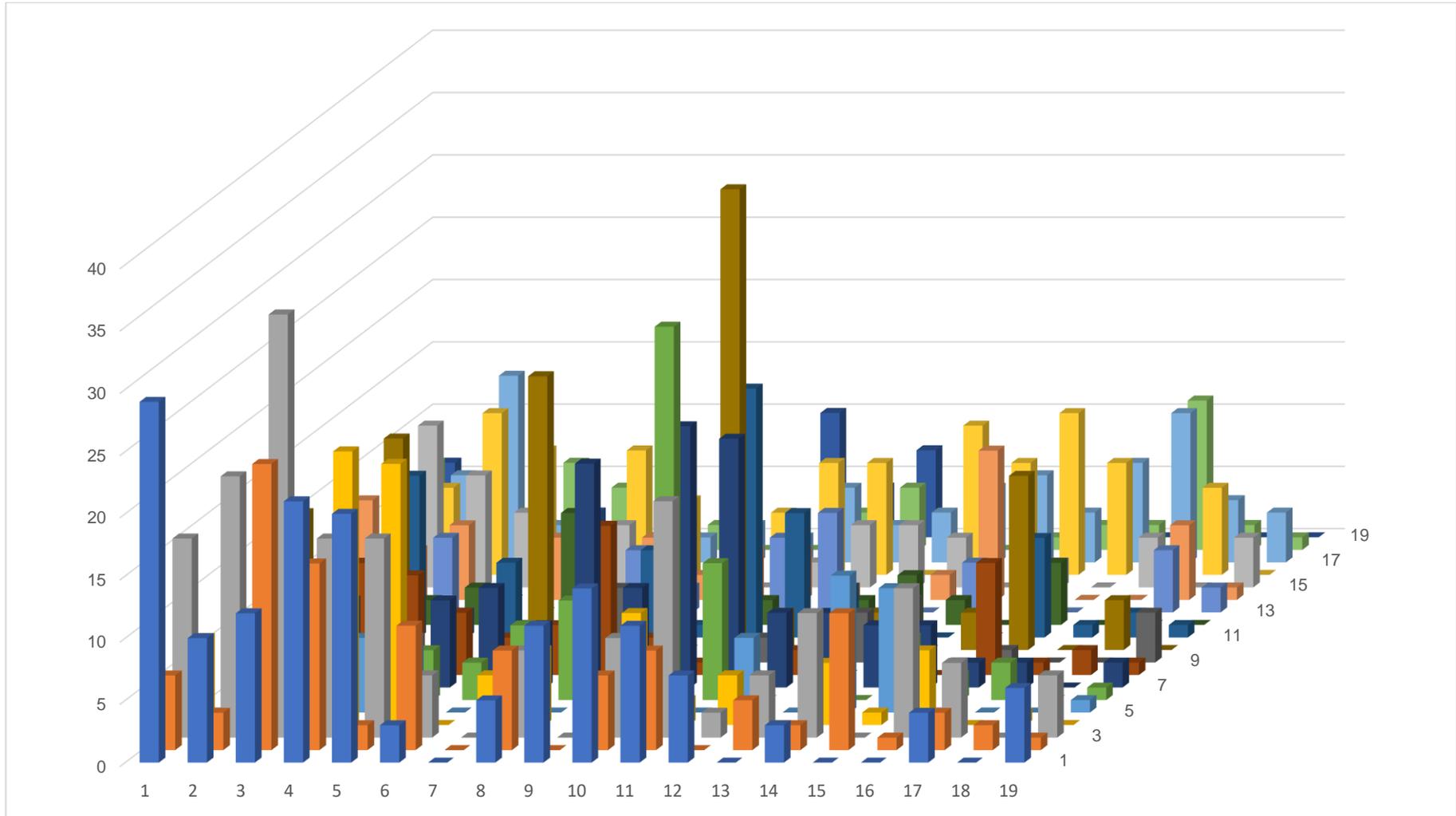


Figura 4.4 Matriz origen-destino de la ciudad de Ibarra

De acuerdo con la Tabla 4.6 sobre la matriz origen-destino de la ciudad de Ibarra, existen viajes interzonales e intrazonales “ V_{ij} ” (sombreado de color verde), los cuales al ser sumados en filas dará como resultado el total de viajes generados en la zona “ O_i ” (sombreado de color amarillo), y en columnas el total de viajes atraídos por la zona “ D_j ” (sombreado de color azul). En este sentido, para cada una de las zonas se cumple que:

$$O_i, D_j = V_{ij} \quad [3.3]$$

Donde:

O_i : Viajes resultantes que se originan en la zona i

D_j : Viajes resultantes captados por la zona j

V_{ij} : Total viajes generados en la zona i atraídos por la zona j

4.2.2.3 Etapa 3. Partición modal

En la tercera fase del análisis de movilidad, se estudia la manera cómo se transportan los usuarios. Por esta razón, se han tomado en cuenta medios de transporte como el automóvil particular, autobús y taxi.

Tabla 4.7 Viajes realizados por medio de transporte

Medio para transportarse	Entre semana	Fin de semana	Últimos 7 días	Subtotal
Vehículo Particular	410	128	90	628
Autobús	509	111	82	702
Taxi	246	52	59	357
			Total viajes	1687

En la Tabla 4.7 se suman los viajes realizados en tres períodos: entre semana, fin de semana y los últimos siete días, de acuerdo con los datos recopilados en la encuesta. De esta manera se tiene que en vehículo particular hubo 628 viajes, en autobús 702 y en taxi 357, dando como resultado un total de 1687 viajes.

De igual manera, en la Figura 4.5 se indica la cantidad de viajes realizados según el medio de transporte empleado.

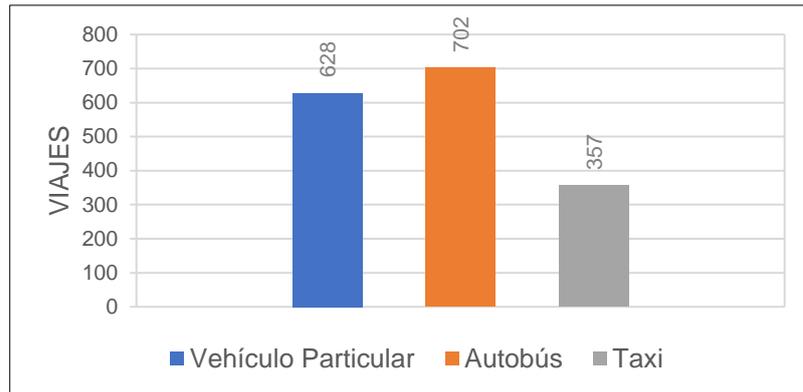


Figura 4.5 Viajes realizados en función del medio de transporte empleado

A continuación, la Ecuación 3.4 demuestra el resultado de la tercera fase del modelo de 4 etapas que se refiere al reparto de viajes según el modo (y medio) de transporte.

$$\sum_m V_{ij}^m = V_{ij} \quad [3.4]$$

Donde:

m: modo de transportarse

V_{ij}: viajes de las zona de origen i con destino j

$$\begin{aligned} \sum_{1 \text{ modo}} V_{\text{vehículos motorizados}} &= V_{1687} \\ \sum_{1 \text{ modo}} V_{(\text{vehículo particular} + \text{autobús} + \text{taxi})} &= V_{1687} \\ \sum_{1 \text{ modo}} V_{(628 + 702 + 357)} &= V_{1687} \\ \sum_{1 \text{ modo}} V_{1687} &= V_{1687} \\ 1687 &= 1687 \end{aligned}$$

4.2.2.4 Etapa 4. Asignación de rutas

Para efectuar la cuarta y última etapa del método aplicado en el análisis de la movilidad urbana, se tuvo en cuenta los parámetros definidos en el capítulo 3. De esta manera, se inicia con el establecimiento de las rutas de mayor concurrencia conforme a la Matriz Origen-Destino de la ciudad de Ibarra.

Como es de suponer, existe un extenso número de rutas (263), originadas por el desplazamiento entre zonas. Sin embargo, en la Tabla 4.8 se ordenan de manera descendente las 20 rutas con mayor número de viajes, indicando el origen y destino de cada una de estas.

Tabla 4.8 Rutas con mayor número de viajes conforme a Matriz OD de Ibarra

Orden	Origen	Destino	Viajes
1	10. Laguna Mall, Hosp. SV. de Paúl, Coliseo LL. Franco (ZH2)	10. Laguna Mall, Hosp. SV. de Paúl, Coliseo LL. Franco (ZH2)	37
2	3. El Olivo, Universidades, Mdr. Arcángel (ZU3)	3. El Olivo, Universidades, Mdr. Arcángel (ZU3)	34
3	6. Cruz Verde, Los Ceibos (ZU6)	10. Laguna Mall, Hosp. SV. de Paúl, Coliseo LL. Franco (ZH2)	30
4	1. Htos. Familiares, Estadio UTN, ITCA (ZU1)	1. Htos. Familiares, Estadio UTN, ITCA (ZU1)	29
5	2. Alpachaca, Las Palmas, Ajaví (ZU2)	3. El Olivo, Universidades, Mdr. Arcángel (ZU3)	23
6	10. Laguna Mall, Hosp. SV. de Paúl, Coliseo LL. Franco (ZH2)	6. Cruz Verde, Los Ceibos (ZU6)	22
7	4. La Victoria (ZU4)	4. La Victoria (ZU4)	22
8	1. Htos. Familiares, Estadio UTN, ITCA (ZU1)	4. La Victoria (ZU4)	21
9	3. El Olivo, Universidades, Mdr. Arcángel (ZU3)	2. Alpachaca, Las Palmas, Ajaví (ZU2)	21
10	4. La Victoria (ZU4)	5. Yacucalle, Pílanquí (ZU5)	21
11	7. UE Atahualpa, UE M.T. Bacq (Caranqui) (ZU7)	10. Laguna Mall, Hosp. SV. de Paúl, Coliseo LL. Franco (ZH2)	21
12	1. Htos. Familiares, Estadio UTN, ITCA (ZU1)	5. Yacucalle, Pílanquí (ZU5)	20
13	11. Mcdo. Amazonas, TIA, Est. Ferrocarril (ZH3)	10. Laguna Mall, Hosp. SV. de Paúl, Coliseo LL. Franco (ZH2)	20
14	7. UE Atahualpa, UE M.T. Baca (Caranqui) (ZU7)	11. Mcdo. Amazonas, TIA, Est. Ferrocarril (ZH3)	20
15	3. El Olivo, Universidades, Mdr. Arcángel (ZU3)	11. Mcdo. Amazonas, TIA, Est. Ferrocarril (ZH3)	19
16	7. UE Atahualpa, UE M.T. Baca (Caranqui) (ZU7)	8. Pq. Cd. Blanca, CC. La Plaza, Pugacho (ZU8)	18
17	10. Laguna Mall, Hosp. SV. de Paúl, Coliseo LL. Franco (ZH2)	3. El Olivo, Universidades, Mdr. Arcángel (ZU3)	17
18	3. El Olivo, Universidades, Mdr. Arcángel (ZU3)	1. Htos. Familiares, Estadio UTN, ITCA (ZU1)	16
19	3. El Olivo, Universidades, Mdr. Arcángel (ZU3)	4. La Victoria (ZU4)	16
20	3. El Olivo, Universidades, Mdr. Arcángel (ZU3)	5. Yacucalle, Pílanquí (ZU5)	16

Del conjunto de rutas con mayor número de viajes se han tomado en consideración las rutas sombreadas ya que cumplen en su mayoría, las siguientes condiciones:

- Número alto de viajes.
- Representan viajes interzonales dentro de la ciudad.
- Tienen por origen y destino zonas urbanas (ZU) y zonas perimetrales (ZP).
- Existe una distancia considerable entre las zonas de origen y destino.
- Permiten la posibilidad de que al ser diseñadas atraviesen zonas del hipercentro.

Adicionalmente, para el desarrollo del trayecto completo de las rutas se tomarán en cuenta las zonas de origen y destino con mayor número de viajes, con el fin de que se atreviesen sectores con una alta generación y atracción de estos. La Tabla 4.9 presenta en orden descendente la cantidad de viajes producidos por cada una de las zonas.

Tabla 4.9 Viajes generados por cada zona

Denominación	Zona	Viajes
(ZU3)	El Olivo, Universidades, Mirador Arcángel	182
(ZU1)	Huertos Familiares, Estadio UTN, ITCA	156
(ZU7)	UE Atahualpa, UE M.T. Bacq (Caranqui)	135
(ZP5)	La Florida	130
(ZH2)	Laguna Mall, Hospital San Vicente de Paúl, Coliseo Leoro Franco	120
(ZU4)	La Victoria	108
(ZU2)	Alpachaca, Las Palmas, Ajaví	105
(ZP6)	10 de Agosto, Yuyucocha	98
(ZU6)	Cruz Verde, Los Ceibos	94
(ZH3)	Mercado Amazonas, TIA, Estación del Ferrocarril	83
(ZP3)	Azaya, Parque del Recuerdo	67
(ZU8)	Parque Ciudad Blanca, CC. La Plaza, Pugacho	66
(ZP2)	Sector Yahuarcocha	60
(ZU5)	Yacucalle, Pilanquí	59
(ZP1)	Sector Priorato, Aduana	54
(ZP7)	La Campiña, La Primavera, El Tejar	53
(ZH4)	UE. Oviedo, UE. S. Francisco, Parque de la Cometa	41
(ZH1)	Mercado Sto. Domingo, Parques Pedro Moncayo y La Merced	39
(ZP8)	Sector Polideportivo de Caranqui, Academia Mil. San Diego	37
	TOTAL	1687

De igual manera, en la Tabla 4.10 se muestra en orden descendente las zonas de acuerdo con la cantidad de viajes atraídos.

Tabla 4.10 Viajes atraídos por cada zona

Denominación	Zona	Viajes
(ZU3)	El Olivo, Universidades, Mirador Arcángel	199
(ZH2)	Laguna Mall, Hospital San Vicente de Paúl, Coliseo Leoro Franco	182
(ZU1)	Huertos Familiares, Estadio UTN, ITCA	130
(ZU4)	La Victoria	127
(ZH3)	Mercado Amazonas, TIA, Estación del Ferrocarril	124
(ZU2)	Alpachaca, Las Palmas, Ajaví	111
(ZU5)	Yacucalle, Pílanquí	104
(ZU8)	Parque Ciudad Blanca, CC. La Plaza, Pugacho	89
(ZU6)	Cruz Verde, Los Ceibos	81
(ZP5)	La Florida	79
(ZP2)	Sector Yahuarcocha	78
(ZH1)	Mercado Sto. Domingo, Parques Pedro Moncayo y La Merced	61
(ZP3)	Azaya, Parque del Recuerdo	61
(ZP6)	10 de Agosto, Yuyucocha	51
(ZP1)	Sector Priorato, Aduana	50
(ZU7)	UE Atahualpa, UE M.T. Bacq (Caranqui)	45
(ZH4)	UE. Oviedo, UE. S. Francisco, Parque de la Cometa	45
(ZP7)	La Campiña, La Primavera, El Tejar	36
(ZP8)	Sector Polideportivo de Caranqui, Academia Mil. San Diego	34
	TOTAL	1687

En función de estos criterios previamente mencionados se establecen 4 rutas urbanas que se detallan en la Tabla 4.11 tomando en cuenta de cada una de las rutas: el sentido u orientación, las calles y avenidas destacables, los puntos de partida y final como calles e intersecciones para cada viaje.

Tabla 4.11 Caracterización de las rutas urbanas diseñadas

Ruta	Sentido	Calles/Avenidas	Inicio (Calles, Av. e intersecciones)	Fin (Calles Av. e intersecciones)
Ruta 1	(N-S)	Calle Víctor Manuel Guzmán, Dr. Luis Gonzalo Gómez, Av. Fray Vacas Galindo, Av. Teodoro Gómez, Av. El Retorno.	Calle Víctor Manuel Guzmán y calle Uruguay	Av. El Retorno y calle Ricardo Sánchez
	(S-N)	Av. El Retorno, Av. Teodoro Gómez, Av. Fray Vacas Galindo, Manuel Pasquel Monge, Calle Víctor Manuel Guzmán.	Av. El Retorno y calle Ricardo Sánchez	Calle Víctor Manuel Guzmán y calle Uruguay
Ruta 2	(O-E)	Calle Víctor Manuel Guzmán, Manuel Pasquel Monge, Ulpiano Pérez Quiñones, E35, Av. 17 de Julio, Av. Padre Aurelio Espinosa Polit.	Calle Víctor Manuel Guzmán y calle Uruguay	Av. 17 de Julio y calle Gral. José María Córdova
	(E-O)	Av. 17 de Julio, Juan Montalvo, Pedro Moncayo, Jaime Rivadeneira, Calle Víctor Manuel Guzmán.	Av. 17 de Julio y calle Gral. José María Córdova	Calle Víctor Manuel Guzmán y calle Uruguay
Ruta 3	(N-S)	Av. 17 de Abril, Jaime Rivadeneira, Juan de Velasco, Miguel Oviedo, 17 de Julio, calle Hugo Guzmán Lara.	Av. 13 de Abril y calle Ibarra	Calles Hugo Guzmán Lara y Marco Tulio Nieto
	(S-N)	Calle Hugo Guzmán Lara, Carlos Barahona, Tahuando, El Retorno, Juan de Salinas, Germán Grijalva, Aurelio Mosquera Narváez, Arsenio Torres, Calle Ibarra.	Calles Hugo Guzmán Lara y Marco Tulio Nieto	Av. 13 de Abril y calle Ibarra
Ruta 4	(O-E)	Calle Guallupe, Ricardo Sánchez, Tahuando, Carlos Barahona, calle Hugo Guzmán Lara.	Av. Mariano Acosta y calle Guallupe	Calles Hugo Guzmán Lara y Marco Tulio Nieto
	(E-O)	Calle Hugo Guzmán Lara, Carlos Barahona, Tahuando, Av. El Retorno, Ricardo Sánchez, Judith Granda Almeida, calle Guallupe.	Calles Hugo Guzmán Lara y Marco Tulio Nieto	Av. Mariano Acosta y calle Guallupe

- **Ruta urbana 1**

La Tabla 4.12 indica el trayecto de la ruta urbana 1 identificándose la distancia del recorrido, los puntos de origen y destino, así como también, las calles y avenidas para cada uno de los sentidos de circulación.

Tabla 4.12 Características de la ruta urbana 1

Sentido	Calles/avenidas	Inicio (calles, avenidas e intersecciones)	Fin (calles, avenidas e intersecciones)	Longitud de recorrido (km)
(N-S)	Calle Víctor Manuel Guzmán, Dr. Luis Gonzalo Gómez, Av. Fray Vacas Galindo, Av. Teodoro Gómez, Av. El Retorno.	Calle Víctor Manuel Guzmán y calle Uruguay	Av. El Retorno y calle Ricardo Sánchez	3,91
(S-N)	Av. El Retorno, Av. Teodoro Gómez, Av. Fray Vacas Galindo, Manuel Pasquel Monge, Calle Víctor Manuel Guzmán.	Av. El Retorno y calle Ricardo Sánchez	Calle Víctor Manuel Guzmán y calle Uruguay	3,83

En la Figura 4.6 se muestra el recorrido a través de las direcciones descritas en la Tabla 4.12 para ambos sentidos de circulación.

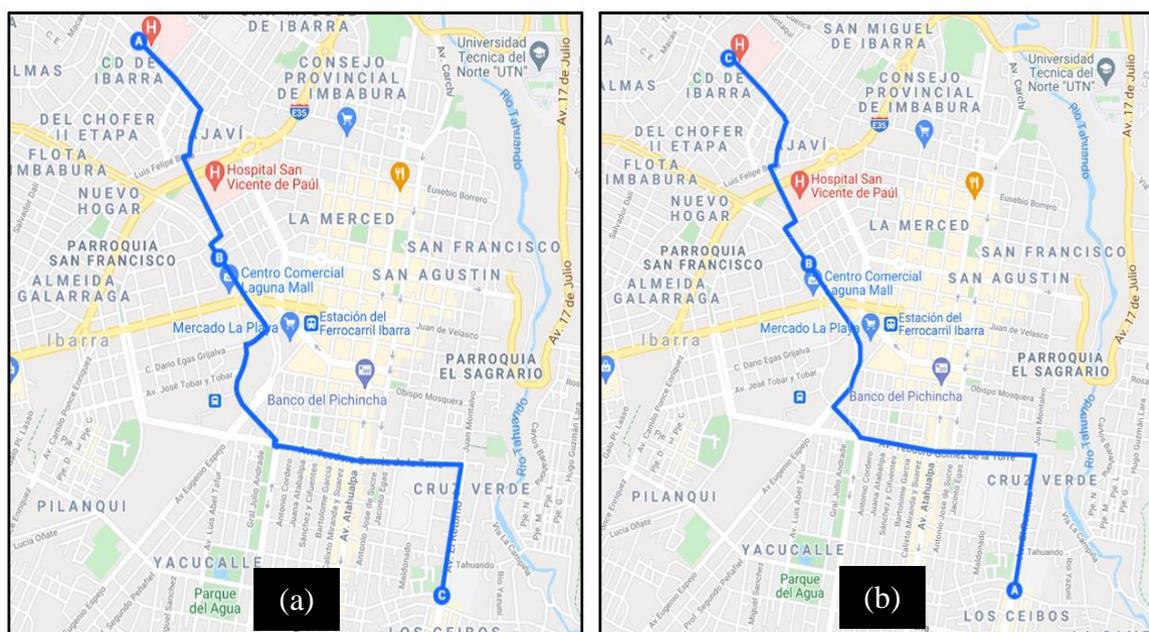


Figura 4.6 Ruta urbana 1 con recorridos (a) N-S y (b) S-N (Google Maps, 2021)

- **Ruta urbana 2**

La Tabla 4.13 indica el trayecto de la ruta urbana 2 identificándose la distancia del recorrido, los puntos de origen y destino, así como también, las calles y avenidas para cada uno de los sentidos de circulación.

Tabla 4.13 Características de la ruta urbana 2

Sentido	Calles/avenidas	Inicio (calles, avenidas e intersecciones)	Fin (calles, avenidas e intersecciones)	Longitud de recorrido (km)
(O-E)	Calle Víctor Manuel Guzmán, Manuel Pasquel Monge, Ulpiano Pérez Quiñones, E35, Av. 17 de Julio, Av. Padre Aurelio Espinosa Polit.	Calle Víctor Manuel Guzmán y calle Uruguay	Av. 17 de Julio y calle Gral. José María Córdova	4,69
(E-O)	Av. 17 de Julio, Juan Montalvo, Pedro Moncayo, Jaime Rivadeneira, Calle Víctor Manuel Guzmán.	Av. 17 de Julio y calle Gral. José María Córdova	Calle Víctor Manuel Guzmán y calle Uruguay	4,87

En la Figura 4.7 se muestra el recorrido a través de las direcciones descritas en la Tabla 4.13 para ambos sentidos de circulación.

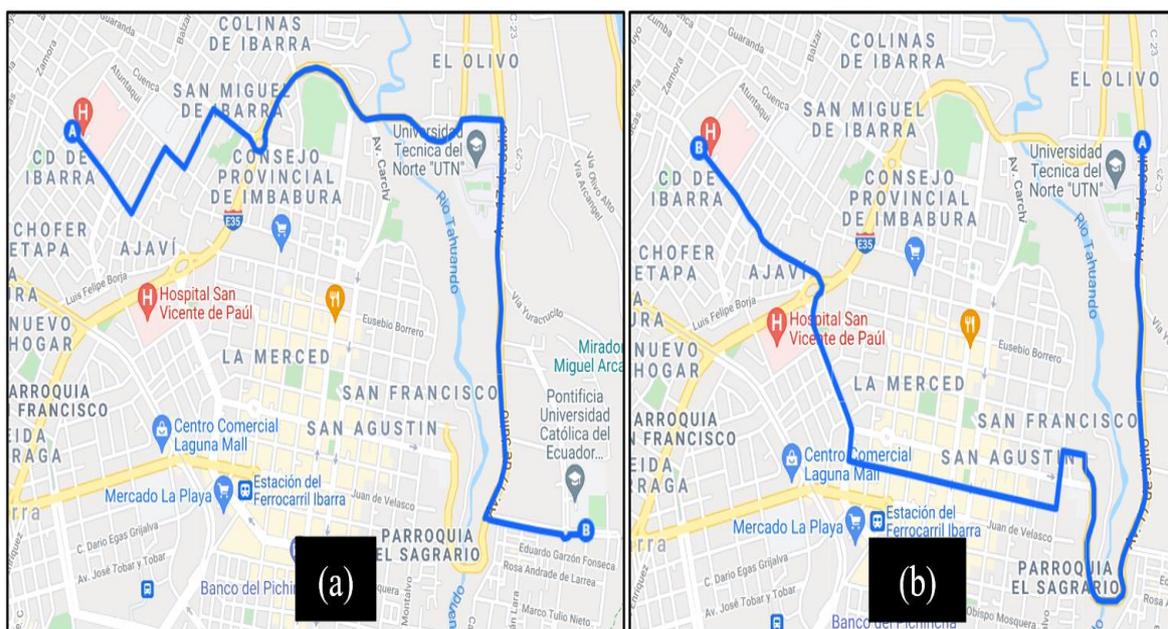


Figura 4.7 Ruta urbana 2 con recorridos (a) O-E y (b) E-O
(Google Maps, 2021)

- **Ruta urbana 3**

La Tabla 4.14 indica el trayecto de la ruta urbana 3 identificándose la distancia del recorrido, los puntos de origen y destino, así como también, las calles y avenidas para cada uno de los sentidos de circulación.

Tabla 4.14 Característica de la ruta urbana 3

Sentido	Calles o Avenidas	Inicio (calles, avenidas e intersecciones)	Fin (calles, avenidas e intersecciones)	Longitud de recorrido (km)
(N-S)	Av. 17 de Abril, Jaime Rivadeneira, Juan de Velasco, Miguel Oviedo, 17 de Julio, calle Hugo Guzmán Lara.	Av. 13 de Abril y calle Ibarra	Calles Hugo Guzmán Lara y Marco Tulio Nieto	4,97
(S-N)	Calle Hugo Guzmán Lara, Carlos Barahona, Tahuando, El Retorno, Juan de Salinas, Germán Grijalva, Aurelio Mosquera Narváez, Arsenio Torres, Calle Ibarra.	Calles Hugo Guzmán Lara y Marco Tulio Nieto	Av. 13 de Abril y calle Ibarra	5,16

En la Figura 4.8 se muestra el recorrido a través de las direcciones descritas en la Tabla 4.14 para ambos sentidos de circulación.

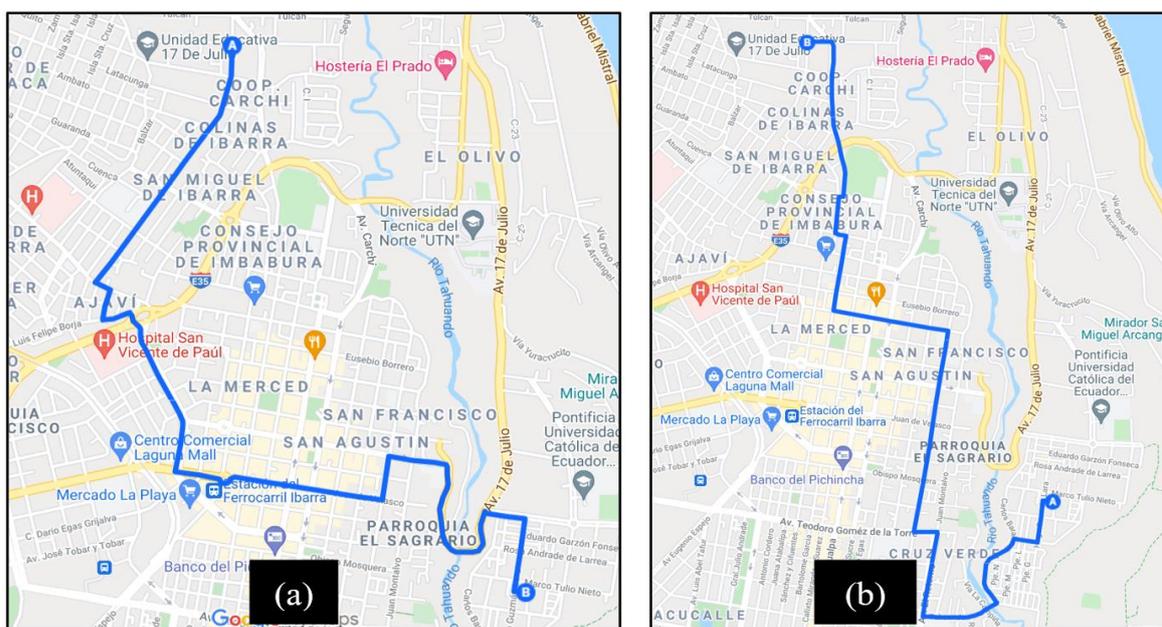


Figura 4.8 Ruta urbana 3 con recorridos (a) N-S y (b) S-N
(Google Maps, 2021)

- **Ruta urbana 4**

La Tabla 4.15 indica el trayecto de la ruta urbana 4 identificándose la distancia del recorrido, los puntos de origen y destino, así como también, las calles y avenidas para cada uno de los sentidos de circulación.

Tabla 4.15 Características de la ruta urbana 4

Sentido	Calles o Avenidas	Inicio (calles, avenidas e intersecciones)	Fin (calles, avenidas e intersecciones)	Longitud de recorrido (km)
(O-E)	Calle Guallupe, Ricardo Sánchez, Tahuando, Carlos Barahona, calle Hugo Guzmán Lara.	Av. Mariano Acosta y calle Guallupe	Calles Hugo Guzmán Lara y Marco Tulio Nieto	4,57
(E-O)	Calle Hugo Guzmán Lara, Carlos Barahona, Tahuando, Av. El Retorno, Ricardo Sánchez, Judith Granda Almeida, calle Guallupe.	Calles Hugo Guzmán Lara y Marco Tulio Nieto	Av. Mariano Acosta y calle Guallupe	4,32

En la Figura 4.9 se muestra el recorrido descrito en la Tabla 4.15 en el sentido de circulación (O-E).

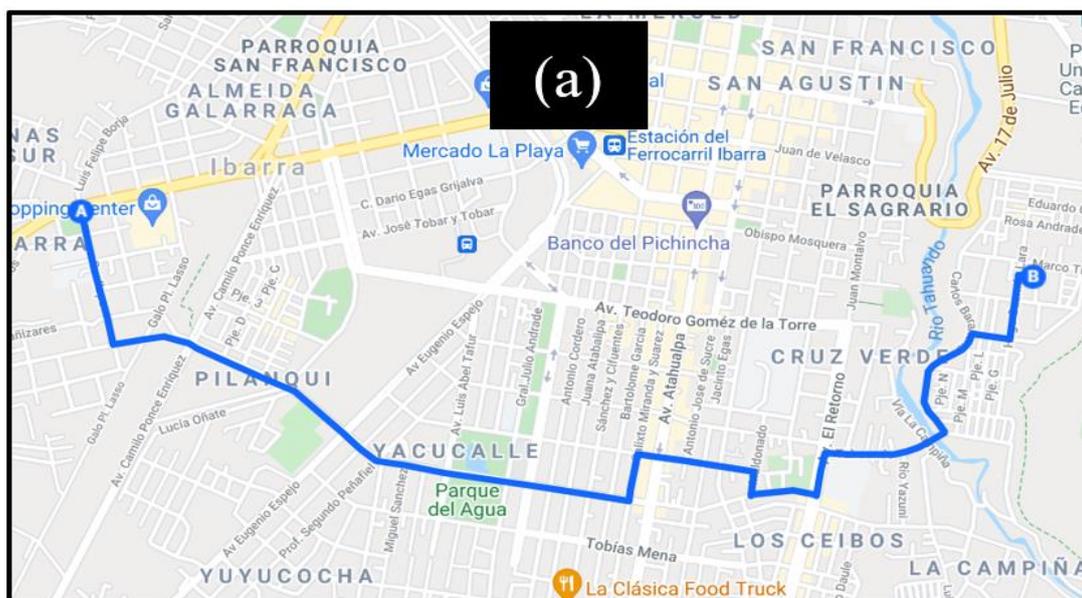


Figura 4.9 Ruta urbana 4 con recorrido (a) O-E
(Google Maps, 2021)

Tabla 4.16 Características de la ruta urbana de ensayo

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, A. Teodoro Gómez, Av. Heleodoro Ayala, Av. Mariano Acosta, Redondel de la Madre, E35, Gualupe, Manuelita Sáenz, Ricardo Sánchez, Av. Atahualpa, Río Cenepa, Av. El Retorno.	17,3

El perfil de elevación de la ruta urbana de ensayo se indica en la Figura 4.11, mostrando una altitud mínima de 2 193 m s. n. m., promedio de 2 220 m s. n. m. y máxima de 2 333 m. Contando con 2 204 m s. n. m. en el punto A de salida y con 2 331 m s. n. m. en el punto B de destino, y con una longitud de trayecto de 17,3 km.

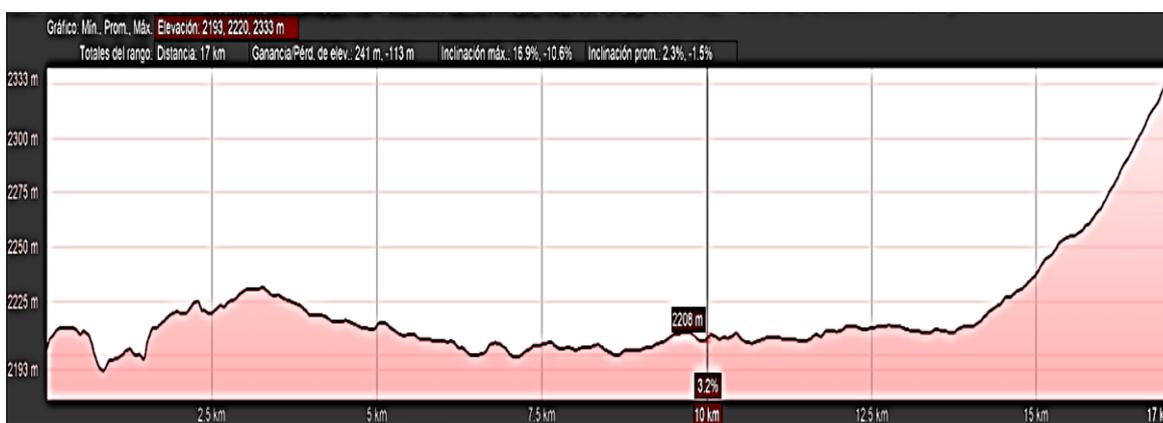


Figura 4.11 Perfil de elevación de la ruta urbana de ensayo
(Google Earth, 2021)

Además, en la Figura 4.12 se presenta el trayecto completo de la ruta urbana de ensayo.

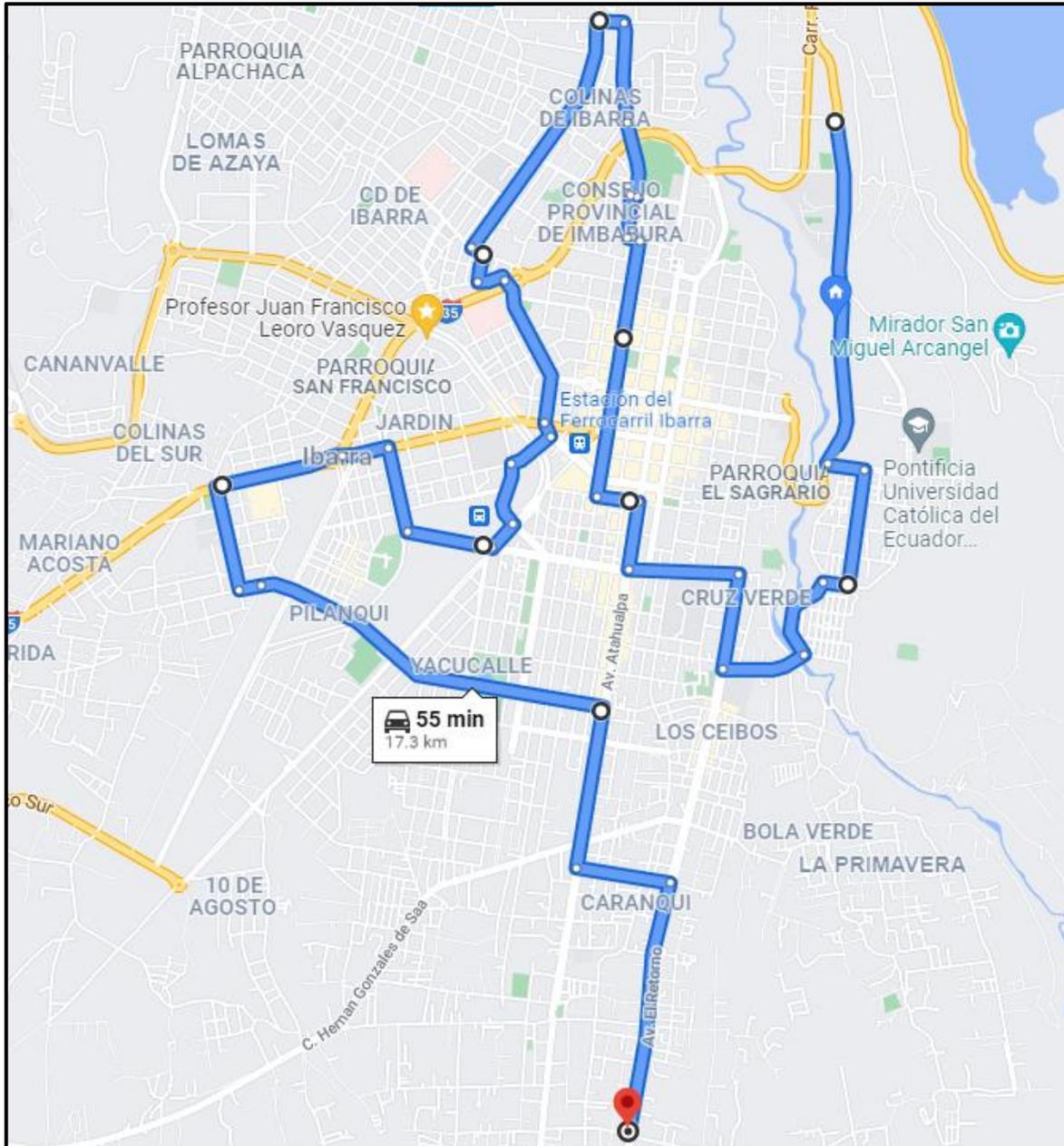


Figura 4.12 Ruta urbana de ensayo
(Google Maps, 2021)

4.3.2 RUTA RURAL DE ENSAYO

Para el diseño de la ruta rural no será necesario un estudio de los patrones de movilidad como el desarrollado para la ruta de ciudad, esto debido a que no representa un esquema complejo de movilidad y se tiene un bajo número de viajes en relación con la parte urbana.

En este sentido, se toma en cuenta principalmente dos aspectos, el primero relacionado a los lugares donde se realizará la ruta y el segundo la distancia a recorrer. Para el primer criterio,

la ruta será desarrollada en las parroquias rurales del cantón Ibarra, siendo estas La Esperanza y San Antonio de Ibarra ya que son las más cercanas a la parte urbana del cantón, lo cual será útil para conectar la ruta urbana con la rural. Por otra parte, en relación al segundo aspecto se debe cumplir lo establecido en el Reglamento UE 2017/1151, precisando que la longitud del trayecto sea mayor a 16 km (Suarez-Bertoa et al., 2019, pág. 4).

En el diseño de la ruta a su vez se da importancia a las condiciones de las vías que atraviesan los sectores rurales, cuyas condiciones deben ser apropiadas para la circulación del vehículo eléctrico, es decir evitando caminos de tercer orden que exijan en sobre medida la circulación al momento de realizar las pruebas de autonomía. La Figura 4.13 indica la ruta rural diseñada para efectuar los ensayos, el punto de inicio se encuentra en la parte derecha de la figura, y el final en la esquina superior izquierda.

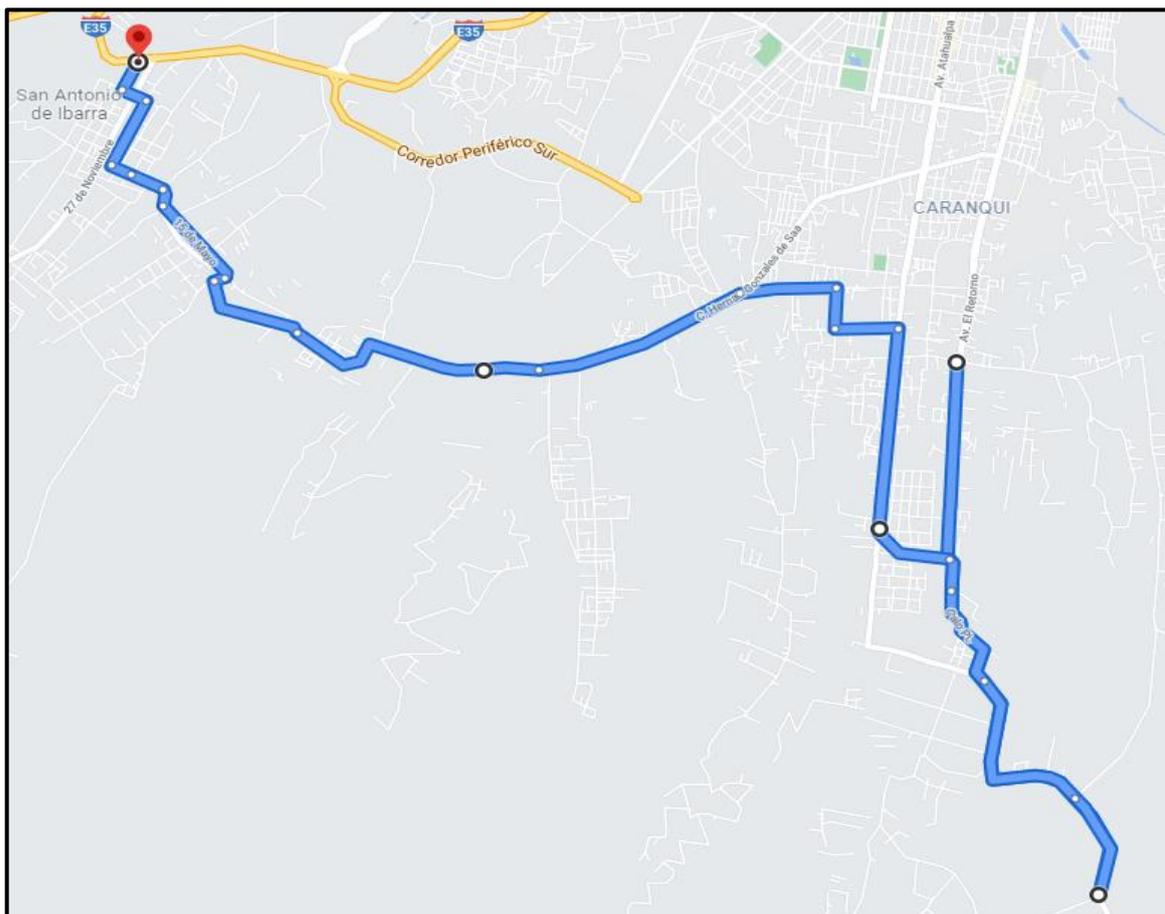


Figura 4.13 Ruta rural de ensayo
(Google Maps, 2021)

En la Tabla 4.17 se muestra el origen, destino, las calles y avenidas en las que se desarrolla la ruta rural, además se indica la distancia total que describe su trayecto.

Tabla 4.17 Características de la ruta rural de ensayo

Inicio	Destino	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 Pl., Vía a Olmedo, Giro en U en Cuartel Yahuachi y retorno por Vía a Olmedo, Calle Galo Pl., 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

El perfil de elevación de la ruta rural de ensayo se indica en la Figura 4.14, mostrando una altitud mínima de 2 280 m s. n. m., promedio de 2 423 m s. n. m. y máxima de 2 629 m. Contando con 2 333 m s. n. m. en el punto A de salida y con 2 316 m s. n. m. en el punto B de destino, y con una longitud de trayecto de 17,6 km.

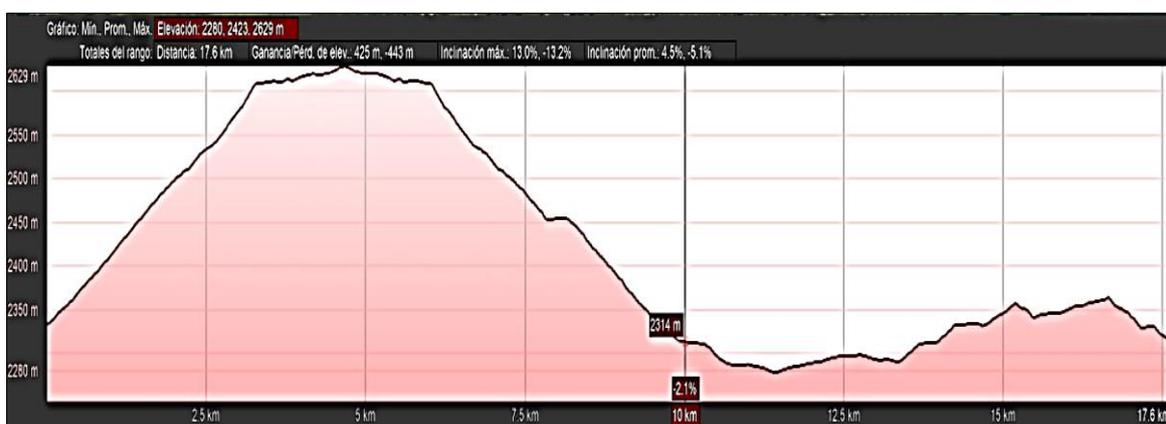


Figura 4.14 Perfil de elevación de la ruta rural
(Google Earth, 2021)

4.3.3 RUTA DE AUTOPISTA

Mediante la matriz origen destino cantonal se analiza el número de viajes y los lugares de destino preferidos por los habitantes de Ibarra, lo cual permitirá conocer la afluencia de viajes desde Ibarra hacia distintos destinos fuera del núcleo urbano y rural del cantón.

Tabla 4.18 Matriz Origen – Destino cantonal para usuarios de autobús

Origen/Destino	Antonio Ante	Cotacachi	Otavalo	Quito	San Lorenzo
Ibarra	3 117	9 351	68 574	130 917	12 468
Total	3 117	9 351	68 574	130 917	12 468

Fuente: (Plan de Movilidad Sustentable Del Cantón Ibarra, 2015, pág. 349)

De acuerdo con la Tabla 4.18 se decide tomar en cuenta la panamericana E35, ya que es la vía más empleada para dirigirse hacia los destinos de mayor concurrencia para los habitantes de Ibarra, siendo estos las ciudades de Quito y Otavalo, con un total de 130 917 y 68 574 viajes, respectivamente.

Para el diseño de la ruta de autopista se contempló la distancia establecida por el Reglamento UE 1151/2017, la cual deber estar comprendida entre los rangos de un 23-43 % del total del recorrido. Por lo tanto, se define la ruta de autopista mostrada en la Figura 4.15.

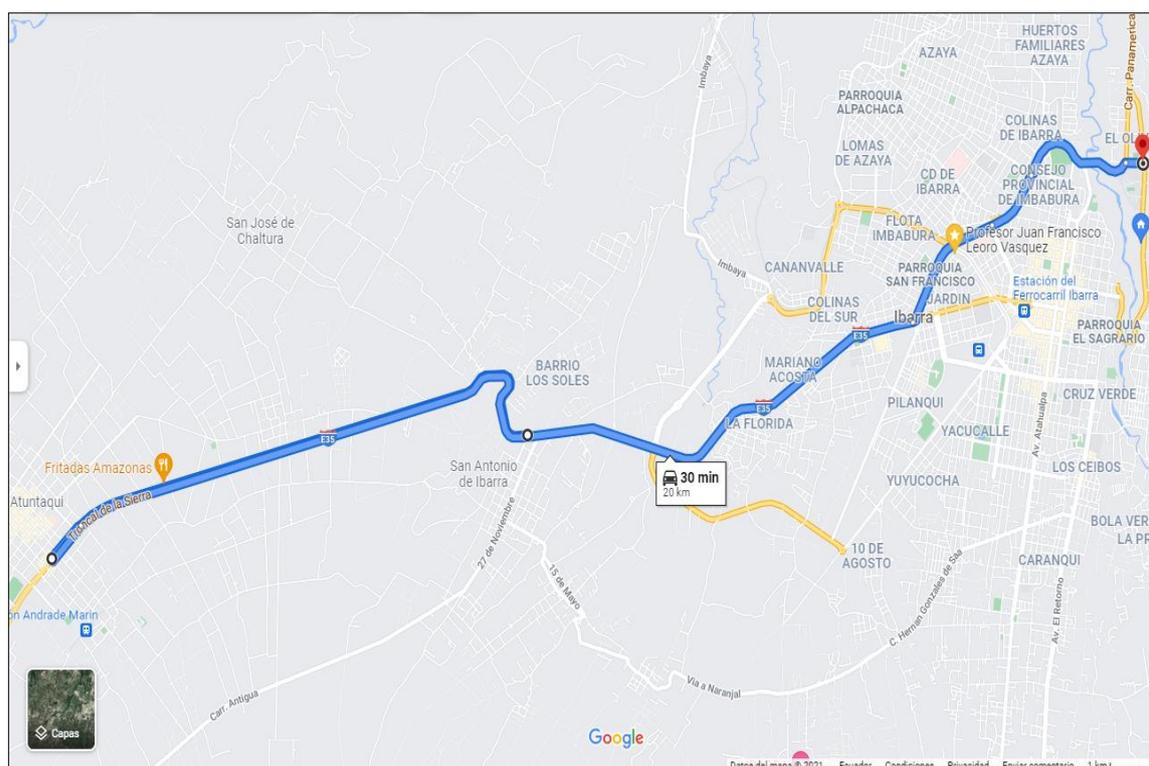


Figura 4.15 Ruta de autopista
(Google Maps, 2021)

En la Tabla 4.19 se presenta el origen, destino, las calles y avenidas para realizar el ensayo de carretera, además se indica la distancia total que describe su trayecto.

Tabla 4.19 Detalles de la ruta de carretera

Orientación	Inicio	Destino	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 Cantón Atuntaqui (E35 y calle Gral. Enríquez)	20
S - N	Desde puente a desnivel en Cantón Atuntaqui	Campus de la UTN - El Olivo	E35, Av. Mariano Acosta, Av. Cristóbal de Troya, E35, calle Dr. Luis Madera, Av. 17 de Julio	

El perfil de elevación de la ruta de autopista se indica en la Figura 4.16, mostrando una altitud mínima de 2 166 m s. n. m., promedio de 2 333 m s. n. m. y máxima de 2 435 m. Contando con 2 315 m s. n. m. en el punto A de salida y con 2 303 m s. n. m. en el punto B de destino, y con una longitud de trayecto de 20 km.

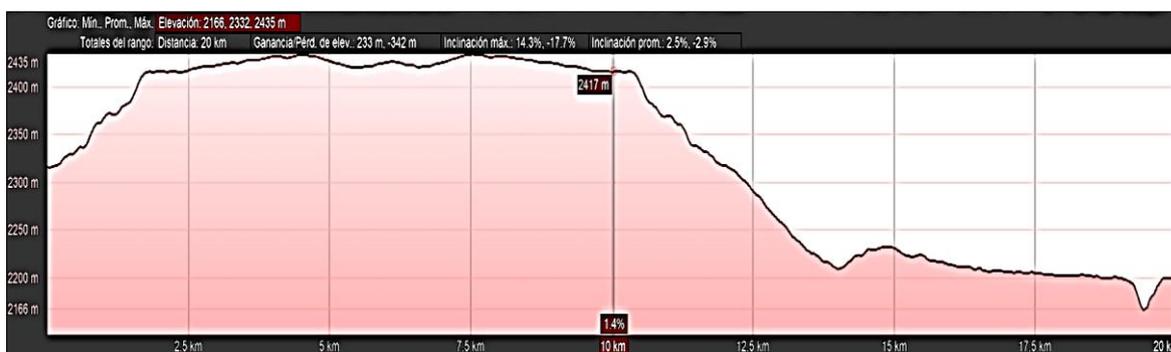


Figura 4.16 Perfil de elevación de la ruta de autopista
(Google Earth, 2021)

4.3.4 RUTA FINAL DE ENSAYO

Finalmente, se crea una ruta que se desarrolla de manera ordenada conforme a lo descrito anteriormente, en primer lugar, se comienza por a la ruta de ciudad a través de calles y avenidas ya descritas y que atraviesan la zona de atracción central de la urbe, luego el trayecto a seguir es mediante la ruta rural o periférica de la ciudad para luego finalizar con la ruta de panamericana con destino a retorno al punto de partida.

Por lo tanto, a través de la unión de las rutas urbana, rural y de autopista se conforma la ruta de ensayo para la obtención del ciclo de conducción y obtención de datos para el análisis de autonomía de vehículo eléctrico, indicándose la misma a continuación en la Figura 4.17.

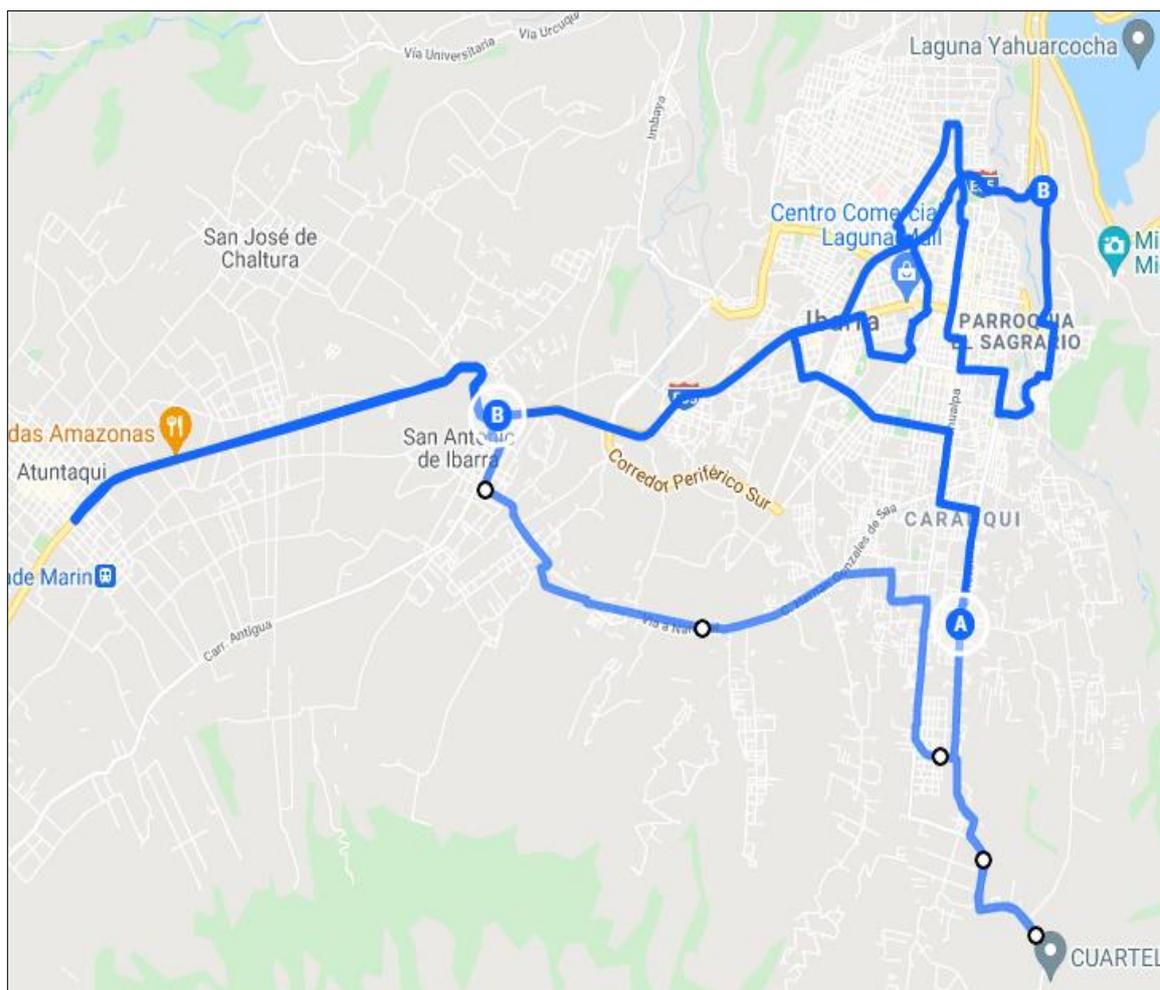


Figura 4.17 Ruta final de ensayo
(Google Maps, 2021)

La ruta establecida cumple con las exigencias de ruta de ensayo tanto en longitud, tipo de terreno, pendientes y condiciones de tráfico para obtención de datos confiables para análisis del trabajo del vehículo eléctrico en condiciones reales de manejo.

En la Tabla 4.20 se muestra el origen y destino de la ruta conformada por los trayectos diseñados inicialmente, así como también la secuencia de ruta y la distancia total de recorrido.

Tabla 4.20 Características de la ruta final de ensayo

Inicio	Destino	Orden de recorrido de rutas	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. Ruta urbana 2. Ruta rural 3. Ruta de carretera	54,9

4.4 CONFORMACIÓN DE LOS CICLOS DE CONDUCCIÓN

Conforme a la realización de la prueba en ruta se registraron un total de 7 566 valores de velocidad que corresponden al ciclo de conducción, el cual está compuesto por la parte urbana, rural y de autopista. A continuación se muestra el perfil de velocidades versus tiempo y los parámetros de cada una de las partes que componen a la ruta final de ensayo

4.4.1 CICLO DE CONDUCCIÓN URBANO

El perfil de velocidades versus tiempo obtenido en la parte urbana de la ruta de ensayo se indica en la Figura 4.18.

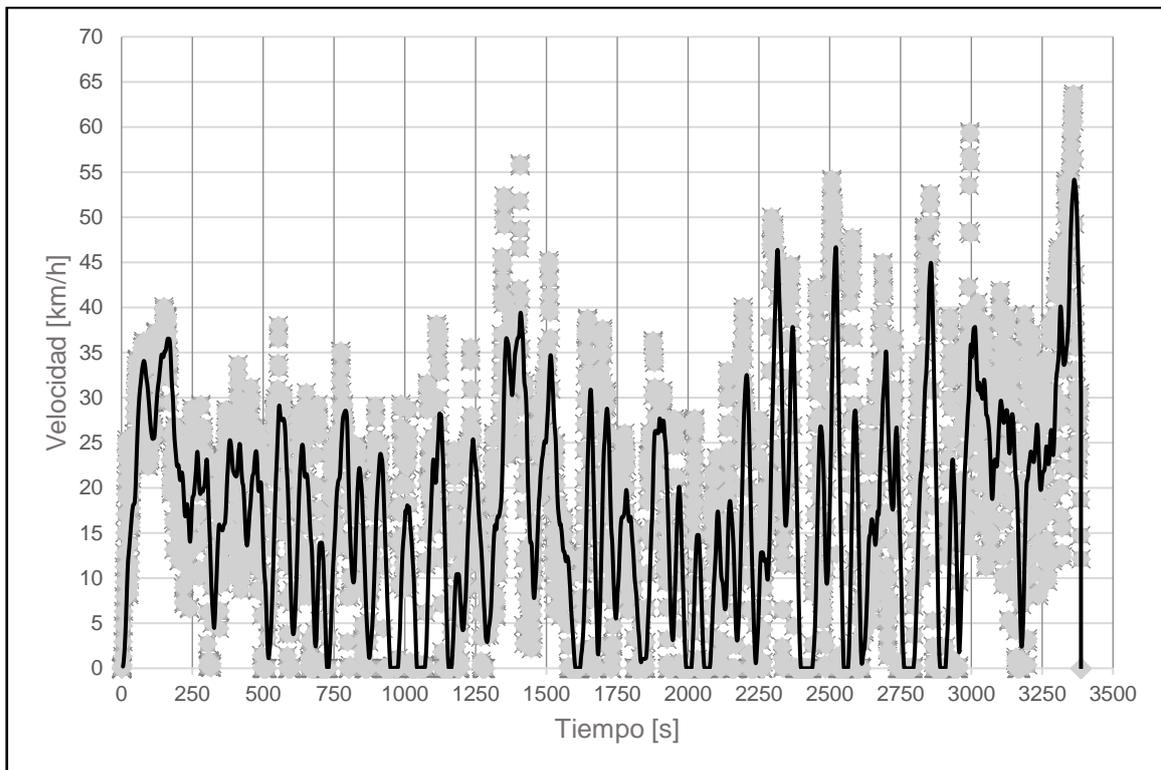


Figura 4.18 Ciclo de conducción urbano

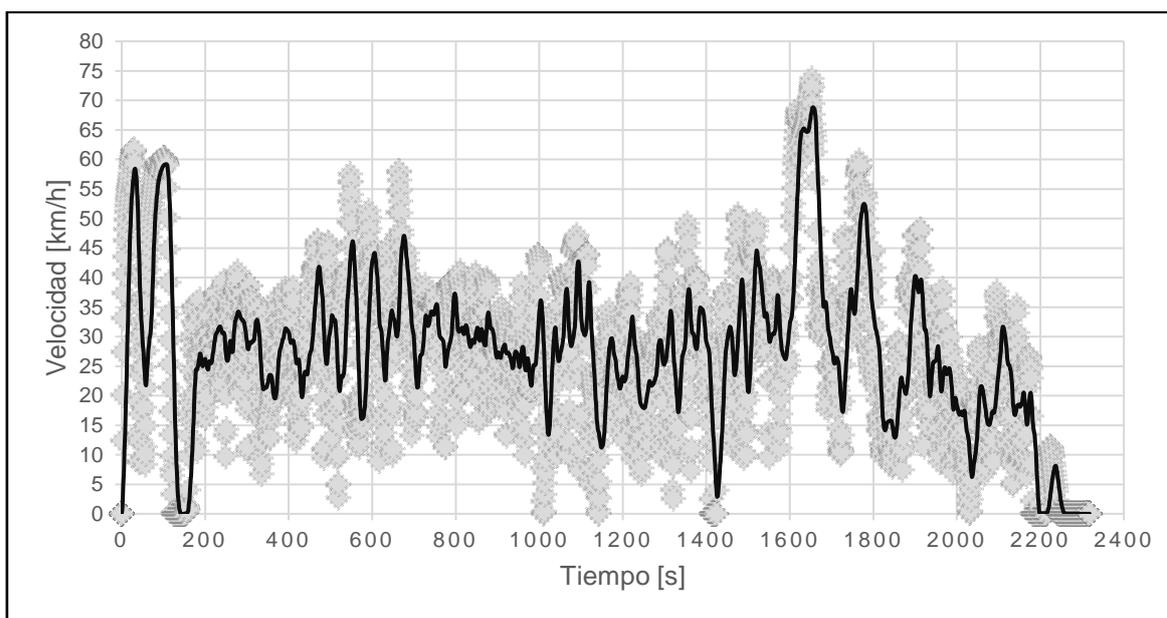
En la Tabla 4.21 se muestran los valores de cada uno de los parámetros correspondientes al ciclo de conducción urbano. Entre los parámetros más importantes que se destacan a continuación se encuentra la duración, velocidades, distancias, aceleraciones, paradas, tiempos y porcentajes de permanencia.

Tabla 4.21 Parámetros del ciclo de conducción urbano

Parámetro	Valor
Duración	3 387 s
Velocidad máxima	63,65 km/h
Velocidad promedio	17,57 km/h
Distancia	17 253 m
Aceleración máxima	3,86 m/s ²
Aceleración promedio positiva	0,53 m/s ²
Número de paradas	36
Tiempo de permanencia en aceleración	1 165 s
Tiempo de permanencia en desaceleración	1 064 s
Tiempo de permanencia en parado	708 s
Tiempo de permanencia en crucero	451 s
Porcentaje de permanencia en aceleración	34,40 %
Porcentaje de permanencia en desaceleración	31,40 %
Porcentaje de permanencia en parado	20,90 %
Porcentaje de permanencia en crucero	13,30 %

4.4.2 CICLO DE CONDUCCIÓN RURAL

El perfil de velocidades versus tiempo obtenido en la parte rural de la ruta de ensayo se indica en la Figura 4.19.

**Figura 4.19** Ciclo de conducción rural

En la Tabla 4.22 se muestran los valores de cada uno de los parámetros correspondientes al ciclo de conducción rural, indicándose valores que permiten una mejor caracterización de este.

Tabla 4.22 Parámetros del ciclo de conducción rural

Parámetro	Valor
Duración	2 318 s
Velocidad máxima	73,71 km/h
Velocidad promedio	27,17 km/h
Distancia	17 783 m
Aceleración máxima	3,44 m/s ²
Aceleración promedio positiva	0,64 m/s ²
Número de paradas	8
Tiempo de permanencia en aceleración	917 s
Tiempo de permanencia en desaceleración	953 s
Tiempo de permanencia en parado	140 s
Tiempo de permanencia en crucero	309 s
Porcentaje de permanencia en aceleración	39,55 %
Porcentaje de permanencia en desaceleración	41,11 %
Porcentaje de permanencia en parado	6,03 %
Porcentaje de permanencia en crucero	13,31 %

4.4.3 CICLO DE CONDUCCIÓN DE AUTOPISTA

A través del procesamiento de los datos obtenidos en el ensayo de conducción con el EV se obtuvo el perfil de velocidades versus tiempo obtenido en la parte de autopista de la ruta de ensayo, el cual se indica en la Figura 4.20.

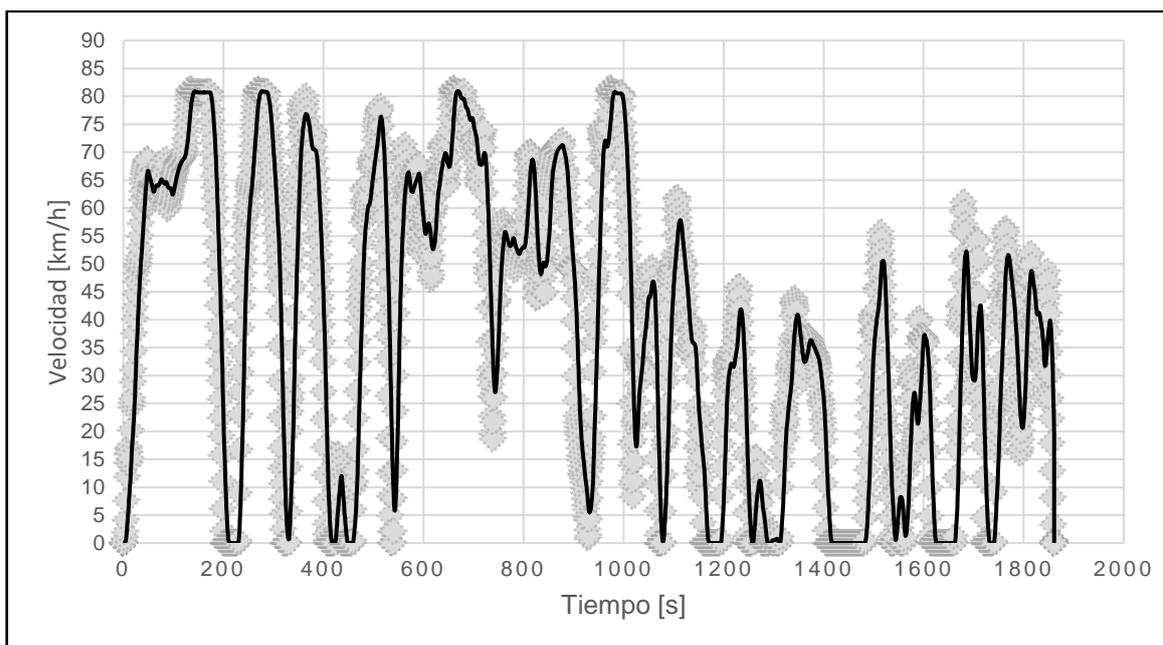


Figura 4.20 Ciclo de conducción de autopista

En la Tabla 4.23 se muestran los valores de cada uno de los parámetros correspondientes al ciclo de conducción de autopista.

Tabla 4.23 Parámetros del ciclo de conducción autopista

Parámetro	Valor
Duración	1 861 s
Velocidad máxima	81,45 km/h
Velocidad promedio	38,63 km/h
Distancia	20 030 m
Aceleración máxima	2,93 m/s ²
Aceleración promedio positiva	0,50 m/s ²
Número de paradas	17
Tiempo de permanencia en aceleración	615 s
Tiempo de permanencia en desaceleración	635 s
Tiempo de permanencia en parado	307 s
Tiempo de permanencia en cruceo	304 s
Porcentaje de permanencia en aceleración	33,05 %
Porcentaje de permanencia en desaceleración	34,12 %
Porcentaje de permanencia en parado	16,50 %
Porcentaje de permanencia en cruceo	16,34 %

4.4.4 CICLO DE CONDUCCIÓN COMBINADO

Los valores de cada uno de los parámetros calculados correspondientes al ciclo de conducción que combina la parte urbana, rural y de autopista se muestran en la Tabla 4.24.

Entre los parámetros más importantes que se destacan a continuación están la duración del ciclo, velocidades, distancias, aceleraciones, paradas, tiempos, y porcentajes de permanencias.

Tabla 4.24 Parámetros del ciclo de conducción combinado

Parámetro	Valor
Duración	7 566 segundos
Velocidad máxima	81,45 km/h
Velocidad promedio	25,76 km/h
Distancia	55 066 m
Aceleración máxima	3,86 m/s ²
Aceleración promedio positiva	0,56 m/s ²
Número de paradas	61
Tiempo de permanencia en aceleración	2 697 s
Tiempo de permanencia en desaceleración	2 652 s
Tiempo de permanencia en parado	1 155 s
Tiempo de permanencia en cruceo	1 064 s
Porcentaje de permanencia en aceleración	35,64 %
Porcentaje de permanencia en desaceleración	35,04 %
Porcentaje de permanencia en parado	15,26 %
Porcentaje de permanencia en cruceo	14,06 %

En la Figura 4.21 se muestra el perfil de velocidades de este ciclo de manejo, indicándose las partes que lo componen.

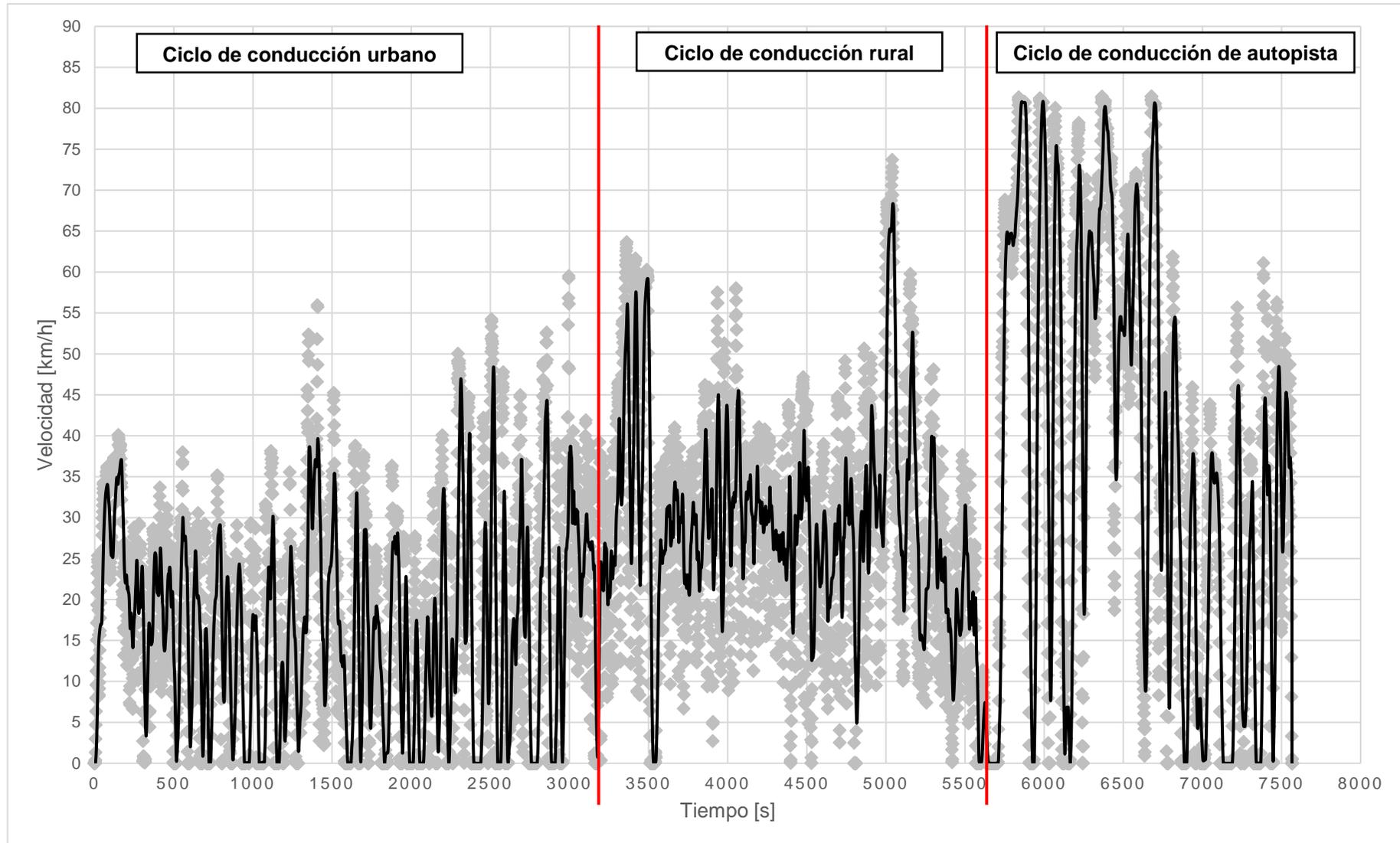


Figura 4.21 Ciclo de conducción combinado

4.5 ANÁLISIS DE LA AUTONOMÍA

En este apartado se estudiaron las variables registradas durante la prueba experimental a bordo del vehículo eléctrico. Cabe señalar que en esta sección únicamente se analizó el comportamiento de ciertos parámetros en una parte del recorrido, a fin de que sea más notoria la influencia de estos sobre la autonomía. Los gráficos completos de todos los parámetros descritos en el capítulo 3 se muestran en el Anexo III.

4.5.1 ANÁLISIS DE AUTONOMÍA EN RUTA URBANA

4.5.1.1 Altitud

Se analizó el comportamiento de la autonomía del EV en función de la altitud, tomando en cuenta que la prueba en ruta de ciudad tuvo una duración de 56,45 minutos, identificándose que la autonomía decrece conforme avanza el tiempo y que, de acuerdo con la altimetría se pueden establecer tramos para su consiguiente análisis. Por esta razón, en la Figura 4.22 se muestra la parte correspondiente a los últimos 9,33 minutos del recorrido urbano.

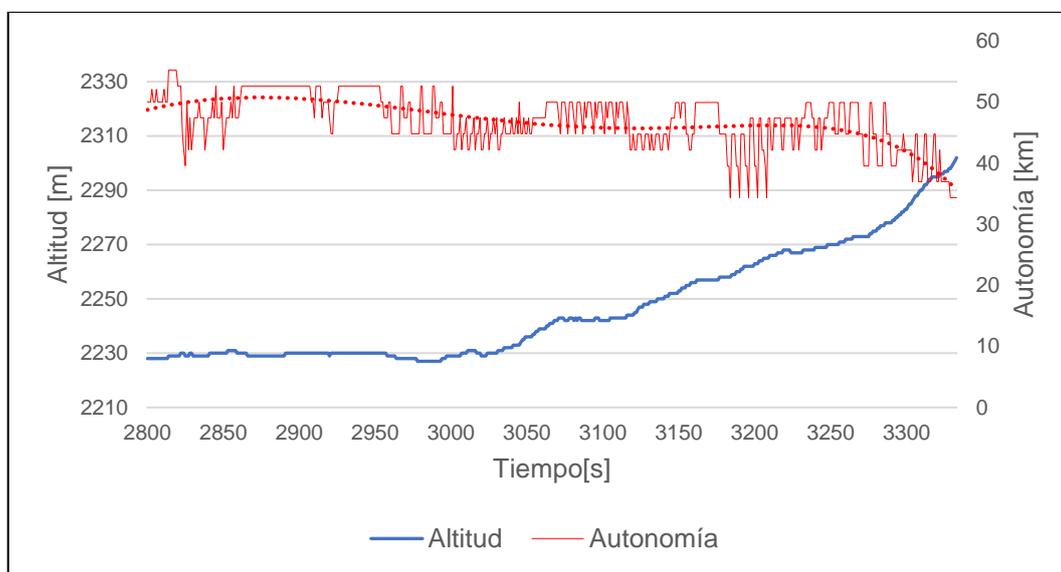


Figura 4.22 Altitud vs. autonomía en un tramo del recorrido urbano

De la figura anterior se establece que en la parte inicial hasta los 3 020 segundos, la altura se mantiene casi constante en 2 230 metros, haciendo que la autonomía no descienda en gran proporción. Por otro lado, a partir de los 3 020 segundos la altitud va desde los 2 230 hasta

los 2 302 metros, lo cual representa una pendiente del 3,07%, mostrando una caída de autonomía desde los 45 hasta los 34 km, que se traduce en una reducción equivalente al 17,41% de la autonomía total.

4.5.1.2 Velocidad

En el recorrido urbano se pudo identificar que la autonomía disminuye de acuerdo con el incremento de la velocidad, mostrándose en la Figura 4.23 un tramo comprendido desde los 2703 hasta los 2795 segundos.

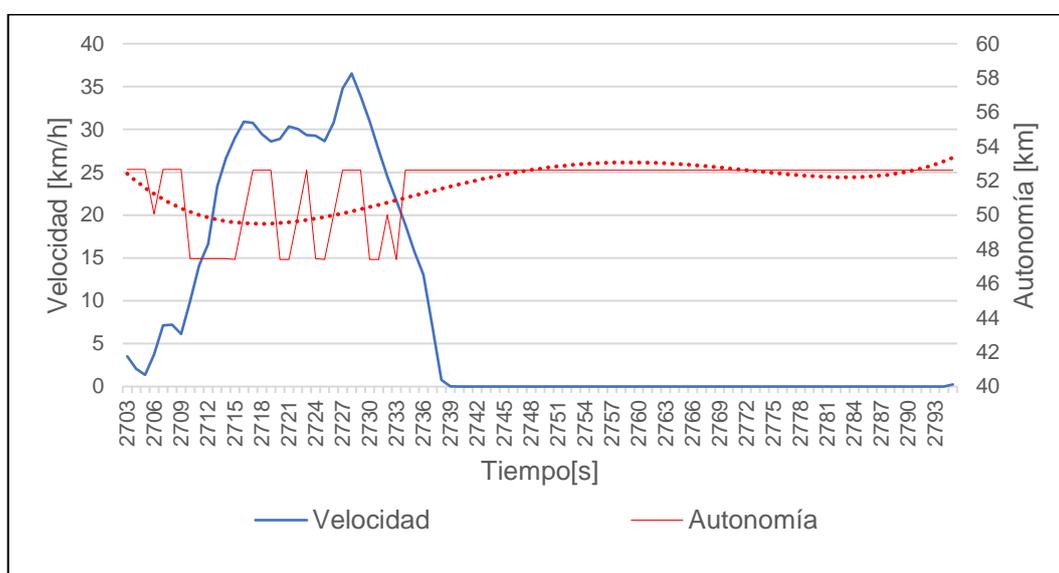


Figura 4.23 Velocidad vs. autonomía en un tramo del recorrido urbano

En este tramo se evidencia que en aceleración la autonomía disminuye, tal como se muestra en los primeros segundos donde la velocidad aumenta de los 2 a los 31 km/h, provocando que la autonomía se reduzca de 53 a 50 km, es decir un 4,76% de la autonomía total. Cuando se mantiene una velocidad crucero de alrededor de 30 km/h (2717-2725 segundos) se muestra en promedio una autonomía de 50 km.

Finalmente, en desaceleración cuando la velocidad desciende desde los 36 km/h hasta casi detenerse (2728-2739 segundos) se presenta un incremento de autonomía de 50 a 52 km, es decir, un 3,17% debido al sistema de frenado regenerativo.

4.5.1.3 Régimen del motor eléctrico

En el tramo final de la ruta urbana representada en la Figura 4.24 y cuya duración es de 3,06 minutos de los 56,45 que dura en su totalidad, se pudo distinguir la variación de autonomía en función del régimen motor.

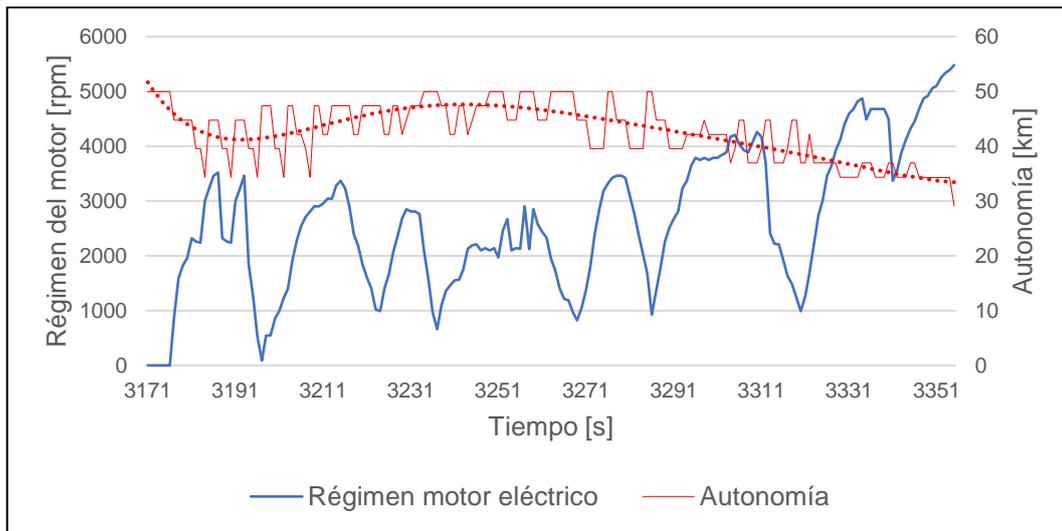


Figura 4.24 Régimen del motor vs. autonomía en un tramo del recorrido urbano

La reducción de autonomía en este período de ascenso y descenso de revoluciones va desde los 50 a los 29 km, representando una disminución del 33,1%. Por otra parte, las revoluciones tienen como valores: mínimo de cero revoluciones, promedio de 3 420 y máximo de 5 480 rpm. De esta manera se establece que a mayores revoluciones del motor la autonomía se reducirá, puesto que el gasto energético será más alto. Mientras que la autonomía tiende a subir y a mantenerse cuando las revoluciones disminuyen.

4.5.1.4 Estado de carga basado en el voltaje (SOCv)

Durante todo el trayecto urbano se puede establecer que las curvas de autonomía y SOCv describen comportamientos similares puesto que la autonomía ha sido calculada en base a este parámetro, siendo la autonomía directamente proporcional al SOCv.

Al realizar un análisis de la parte final del recorrido urbano que dura 15,88 minutos se verificó la tendencia similar de ambas curvas al descenso, es decir, una reducción de

autonomía desde los 53 km hasta los 34 km, mientras que el estado de carga disminuyó desde un 83,36% hasta un 54,28%, esto según la Figura 4.25.

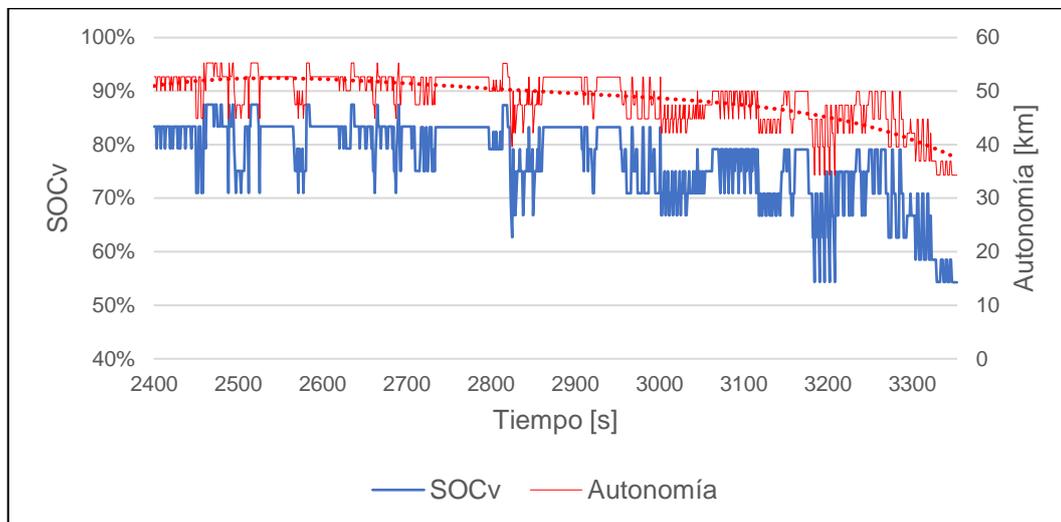


Figura 4.25 SOCv vs. autonomía en un tramo del recorrido urbano

4.5.2 ANÁLISIS DE AUTONOMÍA EN RUTA RURAL

4.5.2.1 Altitud

La tendencia de la curva que describe la autonomía del EV indica diferentes puntos de descarga y regeneración de energía debidos a la pendiente del terreno en ascenso y descenso, respectivamente. Por esta razón, se ha tomado el fragmento inicial del recorrido rural mostrado en la Figura 4.26 y que tiene una duración de 11,72 minutos.

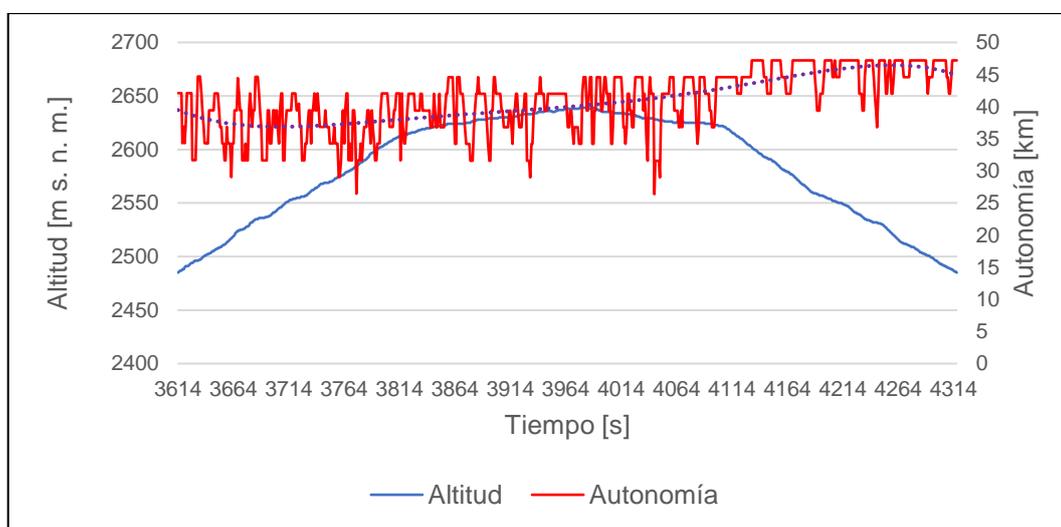


Figura 4.26 Altitud vs. autonomía en un tramo del recorrido rural

De acuerdo con la figura anterior, se evidencia que el aumento de altitud desde los 2 485 hasta los 2 639 metros, lo cual representa una pendiente ascendente del 5,18% provoca que la autonomía describa una caída de 42 a 34 km, equivalente a un 19% del total. Por otro lado, al descender de los 2 639 a los 2 485 metros, que representa una pendiente descendente del 5,13% existe una regeneración de energía haciendo que la autonomía aumente de 34 a 45 km, representando un aumento del 17,41%.

4.5.2.2 Velocidad

En la parte rural del recorrido, los períodos de disminución y regeneración de autonomía son claramente visibles de acuerdo con los perfiles de velocidad trazados. De esta manera, la Figura 4.27 presenta un fragmento del recorrido en la parte rural que dura 2,48 minutos en la cual se puede observar como el incremento de la velocidad provoca que la autonomía disminuya.

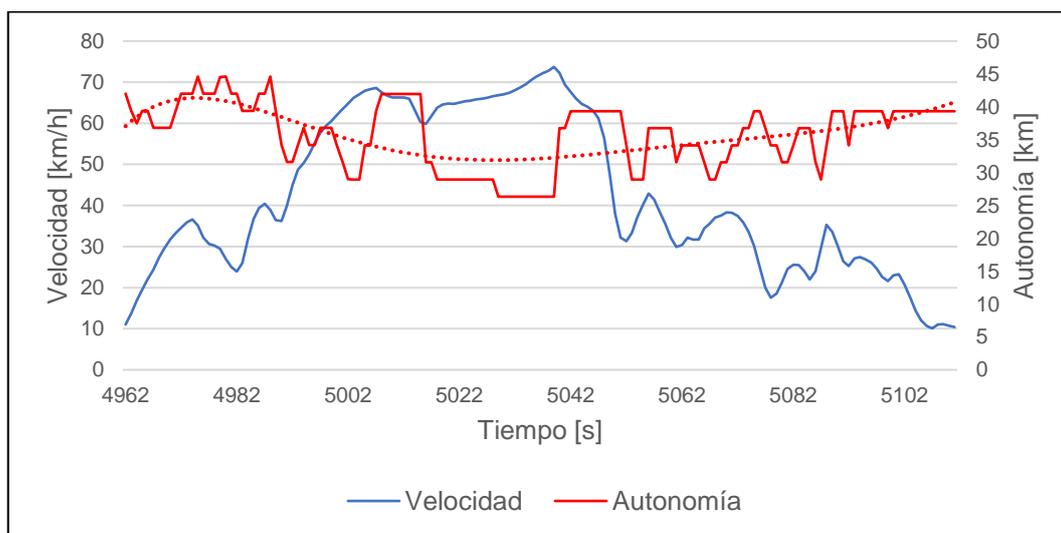


Figura 4.27 Velocidad vs. autonomía en un tramo del recorrido rural

En base al gráfico anterior se observa en el intervalo comprendido entre los 4 962 hasta los 5 039 segundos como la velocidad varía desde los 11 hasta los 72 km/h, ocasionando una caída de autonomía del 25,32% desde los 42 hasta los 26 km.

Lo opuesto ocurre cuando se desacelera por la acción del frenado regenerativo, evidenciándose esto en el período desde los 5 039 hasta los 5 111 segundos, en el cual las velocidades pasan desde los 72 hasta los 11 km/h, provocando un ascenso de autonomía del 20,57%, es decir, de 26 a 39 km. Por lo tanto, a mayor exigencia del motor eléctrico para

adquirir mayor velocidad, se demandará mayor energía a las baterías y con ello, existirá una caída de autonomía.

4.5.2.3 Tensión de batería de tracción

Para el análisis del comportamiento de la tensión de batería de tracción del EV se escogió el tramo del recorrido rural mostrado en la Figura 4.28.

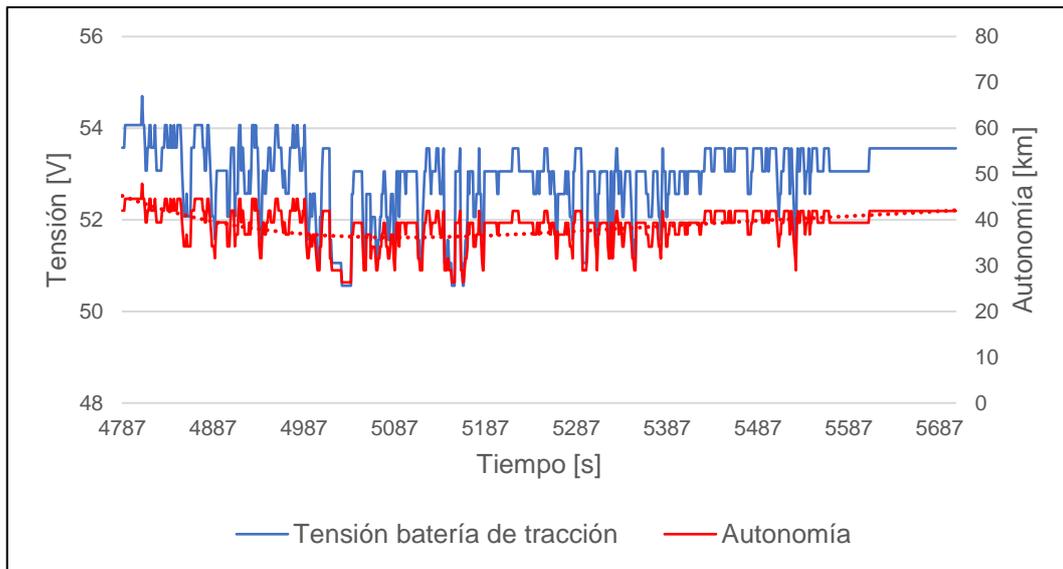


Figura 4.28 Tensión batería de tracción vs. autonomía en un tramo del recorrido rural

De acuerdo con la figura anterior se determina que estos dos parámetros describen un comportamiento análogo y la autonomía es directamente proporcional a la tensión, esto debido a que la autonomía es calculada en base al estado de carga, el cual a su vez, depende de la tensión del paquete de baterías. De esta manera, se puede constatar como la autonomía se reduce de 45 a 42 km, mientras que la tensión de batería de atracción disminuye de 54,1 a 53,6 voltios.

4.5.2.4 Estado de carga basado en el voltaje (SOCv)

Se estudia el desempeño del estado de carga de la batería del vehículo eléctrico en contraste con la autonomía. De esta manera, se puede establecer que ambas curvas describen comportamientos similares, además se puede visualizar la disminución de la autonomía conforme se reduce el SOCv.

Al realizar el análisis de un fragmento del recorrido rural se verificó la tendencia similar de ambas curvas al descenso, es decir, una reducción de la autonomía de 45 a 42 km y el estado de carga desde un 70,6% hasta un 66,3%, esto según la Figura 4.29.

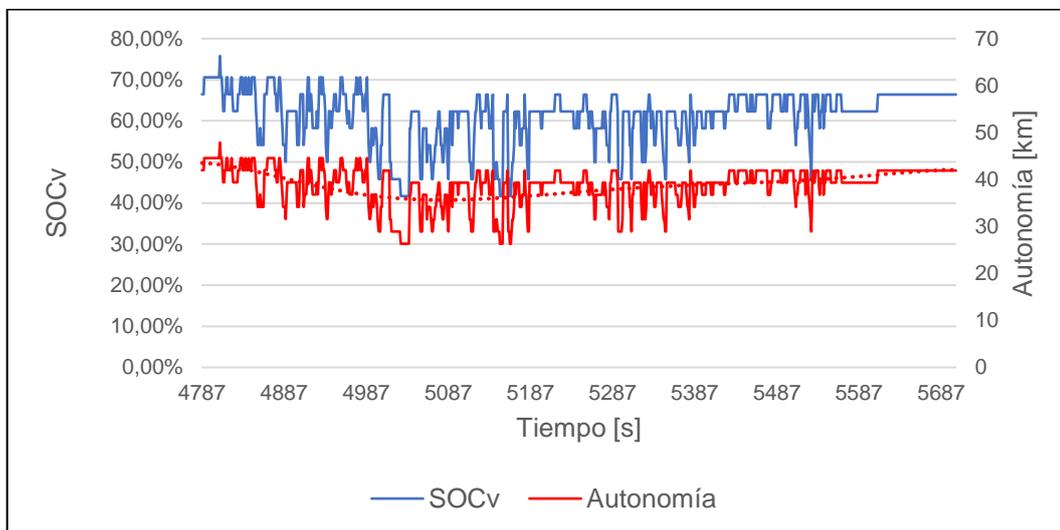


Figura 4.29 SOCv vs. autonomía en un tramo del recorrido rural

4.5.3 ANÁLISIS DE AUTONOMÍA EN RUTA DE AUTOPISTA Y FINAL

4.5.3.1 Altitud

La tendencia de la curva que describe la autonomía del EV en el fragmento del recorrido mostrado en la Figura 4.30 indica que al ascender y descender la pendiente, la autonomía varía.

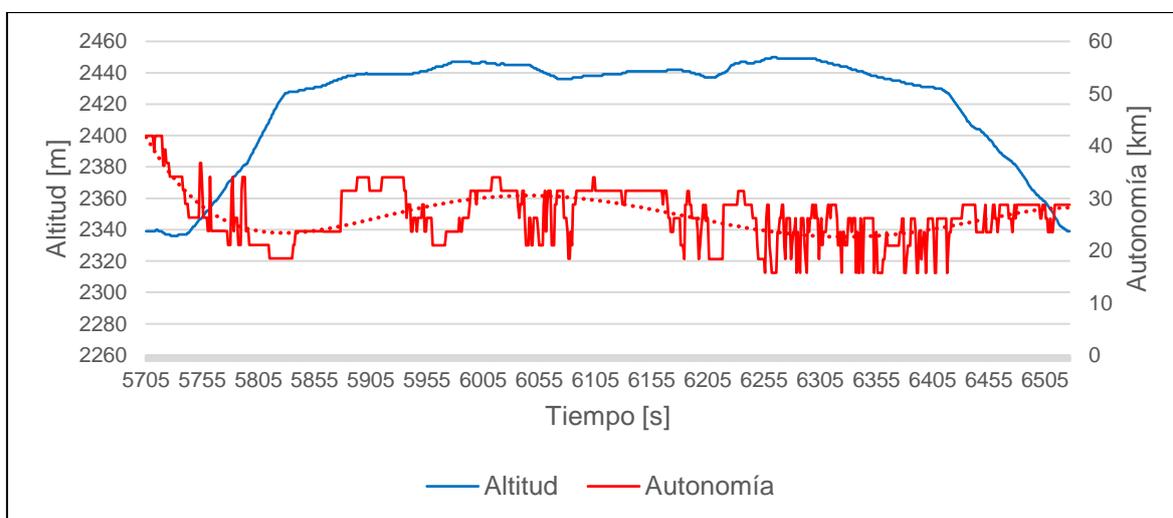


Figura 4.30 Altitud vs. autonomía en un tramo del recorrido de autopista y final

Para el análisis de la figura anterior, se ha dividido la curva de altitud en tres tramos, el primero comprendido desde los 5 705 a los 5 832 segundos en el cual existe una pendiente ascendente del 4,52% con una elevación desde los 2 339 a los 2 428 metros, indicándose una caída de autonomía desde los 42 km hasta los 18 km lo que representa un 38% de la autonomía total.

El segundo tramo corresponde a la parte intermedia, en donde la altitud no varía considerablemente, indicando una caída de autonomía desde los 18 km hasta los 16 km lo que representa un 3,17% de la autonomía total.

En el tramo final comprendido desde los 6 416 a los 6 526 segundos, la altitud disminuye de 2 428 a 2 339 m s. n. m. (altura inicial), teniendo una pendiente descendente del 4,52%, lo que origina una recuperación de autonomía desde los 16 km hasta los 29 km lo que representa un 20,6% de la autonomía total. De esta manera, se evidenció que en la totalidad del tramo mostrado no se pudo recuperar gran parte de la energía cuando se descendió la pendiente final, es decir hubo pérdida del 20,6% de autonomía.

4.5.3.2 Velocidad

En el recorrido de autopista se evidenció que las velocidades de circulación son más altas en relación con los recorridos urbano y rural, viéndose reflejado esto en el fragmento mostrado en la Figura 4.31.

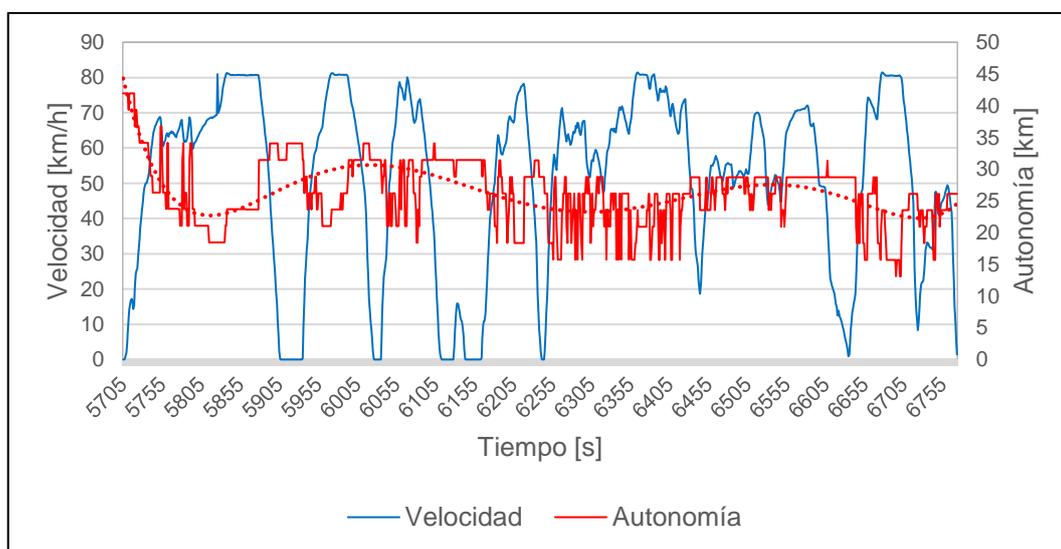


Figura 4.31 Velocidad vs. autonomía en un tramo del recorrido de autopista y final

En la figura anterior se puede observar que la caída de autonomía en este tramo es la más significativa de toda la prueba, esto debido principalmente a las altas velocidades experimentadas, teniendo una velocidad promedio de 40,72 km/h y máxima de 81,45 km/h. Este hecho influyó directamente sobre la autonomía indicándose que al inicio del recorrido la autonomía se situó en 42 km y tras haberse experimentado las altas velocidades y la poca regeneración de energía, esta disminuyó hasta los 26 km, indicando una reducción del 25,32% de la autonomía total. Por lo tanto, se toma en cuenta que la velocidad de circulación del EV influye de manera significativa en la autonomía, deduciendo que con el aumento de velocidad esta tiende a disminuir.

4.5.3.3 Distancia recorrida

En la Figura 4.32 se muestra el aumento de la distancia recorrida por el EV a lo largo de la ruta de autopista que tuvo una duración de 43,43 minutos, evidenciándose una reducción de autonomía conforme avanza el trayecto.

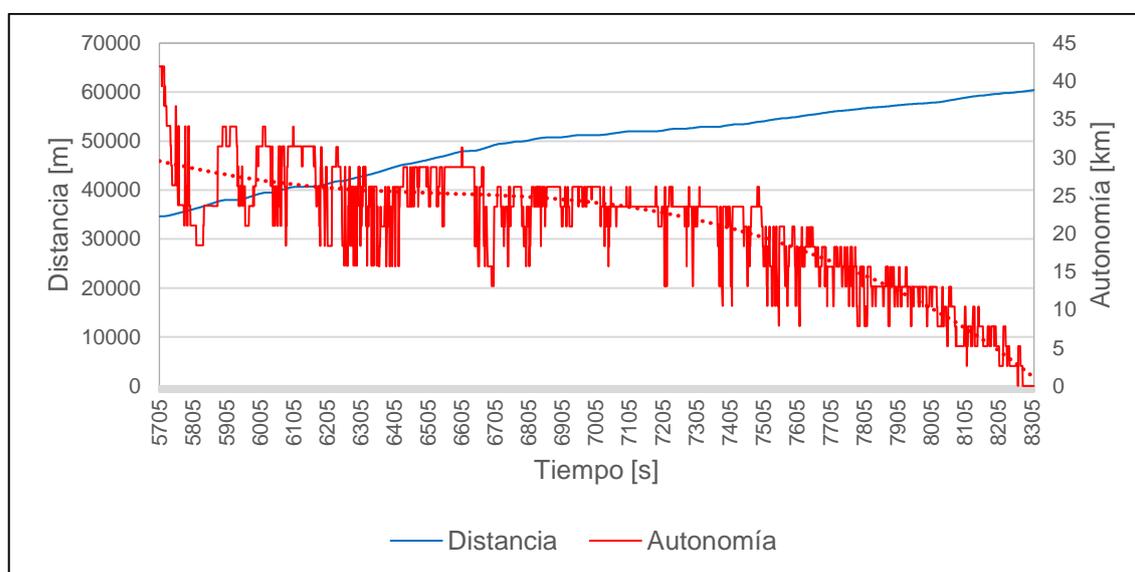


Figura 4.32 Distancia vs. autonomía en un tramo del recorrido de autopista y final

De acuerdo con la figura anterior, la autonomía desciende de los 42 hasta los 0 km, indicando que el EV se ha descargado por completo, mientras que la distancia recorrida aumenta desde los 34,6 hasta los 60,4 km. De igual manera, se evidencia como existe una caída considerable de autonomía en los últimos kilómetros de recorrido, indicándose que la batería tiende a descargarse más rápidamente cuando la autonomía está próxima a agotarse.

4.5.3.4 Estado de carga basado en el voltaje (SOCv)

Para el análisis del comportamiento del SOCv se estudia el recorrido completo de autopista y final, mostrado en la Figura 4.33.

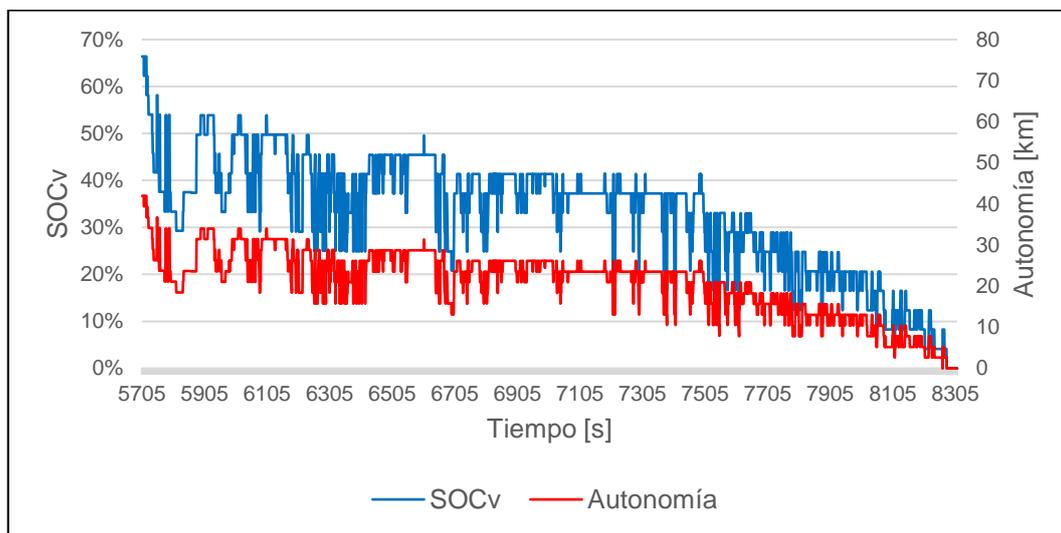


Figura 4.33 SOCv vs. autonomía en un tramo del recorrido de autopista y final

De la figura anterior se pudo analizar que el comportamiento de la autonomía y el estado de carga basado en el voltaje son similares debido a que como se explicó anteriormente, la autonomía se calcula en base a este. Por otra parte, se evidencia como estos dos parámetros decrecen considerablemente en la parte final del recorrido desde los 7 505 hasta los 8 305 segundos, indicando que la batería tiende a descargarse más rápidamente cuando existe un bajo estado de carga, provocando a su vez una caída abrupta de la autonomía.

4.5.4 ANÁLISIS EN CONJUNTO DE LOS PARÁMETROS CON LA AUTONOMÍA

En la Figura 4.34 se muestra el comportamiento de la autonomía del EV en función de parámetros tales como: la velocidad, temperatura del motor eléctrico, estado de carga en base al voltaje, altitud y posición del pedal del acelerador, durante los primeros 13,05 minutos del recorrido efectuado en la ruta rural, indicándose que la altitud inicial y final del tramo son los mismos.

Es importante recalcar que algunos parámetros no se tomaron en cuenta para la gráfica a fin de evitar la saturación de datos, además de que algunos parámetros presentan similitud de

curva al momento del trazo, siendo un ejemplo, la curva del régimen de motor con la de velocidad y la tensión de la batería de tracción semejante al SOCv.

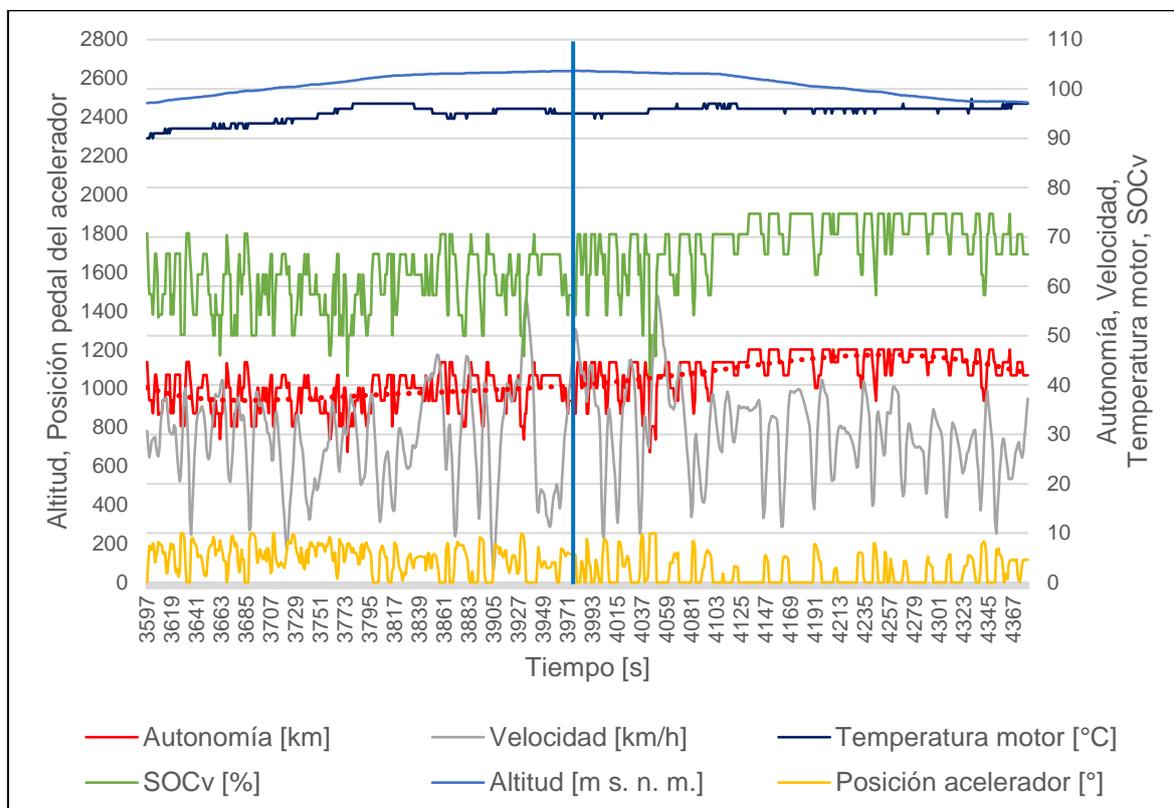


Figura 4.34 Análisis de varios parámetros en un tramo del recorrido

De acuerdo con la figura anterior, en el tramo comprendido entre los 3 597 y los 3 977 segundos, es decir, cuando el EV asciende una pendiente del 5,32% que va desde los 2 475 hasta los 2 639 metros de altura; la autonomía varía de 44,7 a 34,2 km, representando una disminución del 16,62% de la autonomía total. Por otra parte, se identifica que la posición del acelerador presenta valores altos la mayoría del tiempo, indicando el deseo del conductor de utilizar toda la potencia disponible. De igual manera, se evidencia un incremento de temperatura del motor eléctrico de 90 a 95 °C, así como también, valores de velocidad promedio de 30 km/h y máxima de 71 km/h. En cuanto al SOCv, se puede apreciar como este disminuye análogamente a la autonomía, es decir, del 70,76% hasta el 54,12%.

Por el contrario, en el tramo que va desde los 3 978 hasta los 4 380 segundos, período en el cual el EV descendió una pendiente del 4,74% desde los 2 639 hasta los 2 475 metros (altura inicial), empieza la regeneración de energía, mostrándose como la autonomía se incrementa de 34,2 a 42 km al tener varios períodos en los cuales la posición de pedal del acelerador es

ceros, indicando la operación del sistema de frenado regenerativo. La temperatura del motor aumenta únicamente 2 °C, mientras que el SOCv aumenta del 54,12% al 66,47%. De esta manera, se evidencia como el sistema de frenado regenerativo recupera únicamente el 74,21% de la energía gastada durante el ascenso, significando un aumento del 12,35% en la autonomía.

En este sentido, se determina que la exigencia de la batería y del motor eléctrico es mayor cuando se asciende una pendiente y se circula a altas velocidades, mientras que, en el descenso, cuando no se acciona el pedal del acelerador entra a operar el sistema de frenado regenerativo recuperando una parte de la energía gastada.

4.5.5 COMPARACIÓN DE LA AUTONOMÍA Y CONSUMO ESTABLECIDOS POR EL FABRICANTE

La prueba de descarga del vehículo eléctrico realizada en la ruta de ensayo diseñada permitió determinar que, bajo condiciones reales este posee una autonomía de 63,18 km, mientras que, de acuerdo con lo establecido por el fabricante dicha autonomía debería situarse en los 100 km (Renault, 2017). Por otro lado, para la estimación del consumo energético experimentado durante el ensayo de conducción se hace uso de la Ecuación 3.13, mostrada a continuación.

$$C_{er} = \frac{C}{A_t} \quad [3.13]$$

Donde:

C_{er} : Consumo energético del vehículo eléctrico obtenido bajo condiciones reales

C : Capacidad de la batería

A_t : Valor total de autonomía obtenido tras la prueba experimental

$$C_{er} = \frac{6\,100 \text{ Wh}}{63,18 \text{ km}}$$

$$C_{er} = \frac{6\,100 \text{ Wh}}{63,18 \text{ km}}$$

$$C_{er} = 96,55 \text{ Wh/km}$$

De esta manera, el valor de consumo obtenido en este estudio fue de 96,55 Wh/km, mientras que la autonomía se situó en los 63,18 km como se mencionó anteriormente. Cabe recalcar que estos valores se determinaron en base al recorrido completo desarrollado en la ruta de ensayo mixta, es decir, fue el resultado de la relación entre la capacidad de la batería y la autonomía resultante de recorrer la ruta urbana, rural y de autopista.

Los valores de autonomía y consumos estimados en función del tipo de ruta se presentan en la Tabla 4.25, calculados en base al estado de carga experimentado en cada parte del recorrido y la distancia.

Tabla 4.25 Valores de autonomía y consumo obtenidos en el estudio según el tipo de ruta

Tipo de recorrido	Mixto	Urbano (estimación)	Rural (estimación)	Autopista (estimación)
Autonomía	63,18 km	73,35 km	122,70 km	60,79 km
Consumo	96,55 Wh/km	83,17 Wh/km	49,71 Wh/km	100,5 Wh/km

De acuerdo con la tabla anterior, se puede verificar como el consumo más alto corresponde al recorrido en autopista, puesto que el EV experimentó pendientes pronunciadas y altas velocidades de circulación, llegando incluso a la velocidad máxima establecida por el fabricante, lo cual supuso una elevada demanda de energía. Por otro lado, el recorrido rural fue el de menor consumo ya que se tuvieron pocas paradas, velocidades medias de circulación y mayores puntos de regeneración de energía debido a la pendiente descendente del trayecto.

Puesto que el método de evaluación de autonomía y consumo utilizado por el fabricante del EV corresponde a la aplicación del ciclo de conducción urbano ECE, en la Tabla 4.26 se muestra la estimación de la autonomía y consumo perteneciente únicamente al recorrido urbano, a fin de compararlos con los valores establecidos por el fabricante.

Tabla 4.26 Comparativa de la autonomía y consumo establecidos por el fabricante con lo obtenido en el estudio

Condición	Autonomía urbana	Consumo urbano
Según el fabricante	100 km	63 Wh/km
Según el presente estudio	73,35 km	83,17 Wh/km
Variación	26,65%	32,02%

De acuerdo con lo mostrado en la tabla anterior, se establece que existe una disminución del 26,65% en la autonomía y un aumento del 32,02% en el consumo, respecto a lo especificado por el fabricante y al haber sido evaluados bajo las condiciones del actual estudio.

La discrepancia entre los valores especificados por el fabricante y el obtenido bajo condiciones reales tanto de autonomía como de consumo es una problemática a nivel mundial, ocasionada por los diferentes métodos de evaluación y homologación en los EV (Bingley, 2017, pág 42).

Como se mencionó anteriormente, el fabricante del EV ha evaluado la autonomía y el consumo energético en base al ciclo de conducción urbano ECE, el cual presenta un perfil de velocidad muy uniforme y es realizado en un banco dinamométrico, a diferencia del ciclo de conducción urbano que experimentó el EV durante este estudio, el cual fue obtenido mediante condiciones reales de manejo. Por esta razón, los rangos de autonomía y consumo planteados en este estudio serán más cercanos a la realidad, indicando una mayor confiabilidad que las pruebas tradicionales.

4.6 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA AUTONOMÍA

4.6.1 EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS EN LA AUTONOMÍA

4.6.1.1 Resistencia aerodinámica

Para la estimación de la resistencia debida a la acción del aire fue necesario determinar la densidad del aire en la ciudad de Ibarra mediante la Ecuación 3.17 y con los datos de presión barométrica, humedad relativa del aire y temperatura promedio anuales del cantón.

$$\rho_a = \frac{0,348444p - h_r(0,0025t - 0,020582)}{273,15 + t} \quad [3.17]$$

Donde:

ρ_a : Densidad del aire [kg/m³]

p: Presión barométrica [hPa]

h_r : Humedad relativa del aire [%]

t : Temperatura del aire [°C]

$$\rho_a = \frac{(0,348444 * 1015) - 0,775(0,0025 * 16 - 0,020582)}{273,15 + 16}$$

$$\rho_a = \frac{353,67 - 0,01505}{289,15}$$

$$\rho_a = 1,223 \text{ kg/m}^3$$

Una vez obtenidos estos valores se presenta en la Figura 4.35 los resultados de la resistencia aerodinámica a diferentes velocidades.

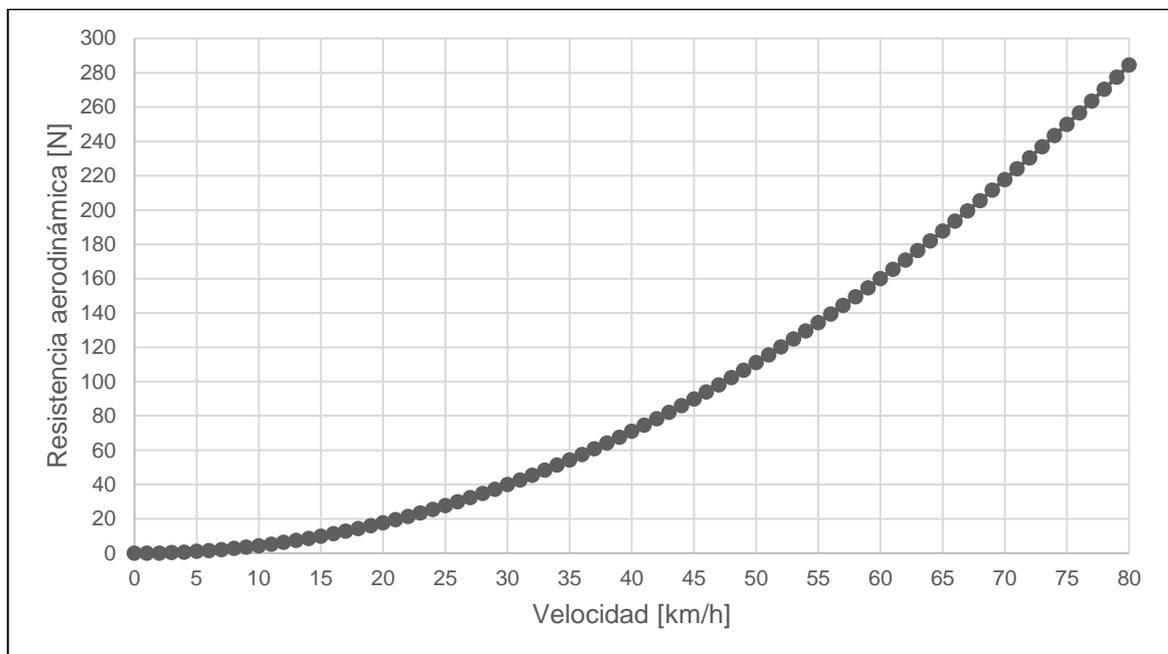


Figura 4.35 Resistencia aerodinámica del EV en función de la velocidad

Se establece que la resistencia aerodinámica aumenta de manera exponencial debido a la velocidad de circulación. De esta manera, a la velocidad máxima (80 km/h) se tiene que la resistencia aerodinámica asciende hasta 284,48 N.

Además, se puede evidenciar como a diferentes intervalos de velocidad se tienen distintos valores de pendiente en la curva de resistencia aerodinámica, tal como se indica en la Tabla 4.27.

Tabla 4.27 Pendiente de curva de resistencia aerodinámica según los intervalos de velocidad.

Velocidad (km/h)	Pendiente
0-30	1,33
30-60	4
60-80	6,22

Conforme a lo indicado en la tabla anterior, se determina que a velocidades de circulación altas se tendrá una mayor pendiente, indicando que la resistencia aerodinámica crecerá en mayor proporción por cada aumento de velocidad en este intervalo.

4.6.1.2 Resistencia por rodadura

Los valores correspondientes a esta resistencia son calculados a través de la Ecuación 3.18 tomando en cuenta el coeficiente de rodadura y los dos casos de análisis mencionados en el capítulo 3.

$$F_{Ro} = m * g * \mu_{ro} \quad [3.18]$$

Donde:

F_{Ro} : Resistencia por rodadura [N]

m : Masa neta del vehículo [kg]

g : Valor de aceleración de la gravedad [m/s^2]

μ_{ro} : Coeficiente de resistencia a la rodadura

$$F_{Ro} = 760 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2 * 0,01$$

$$F_{Ro} = 74,56 \text{ N}$$

Este valor corresponde al EV con el paquete de baterías de fábrica, mientras que el del supuesto de ser reemplazados por los módulos de baterías utilizados por Tesla se muestra a continuación.

$$F_{Ro} = 712 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2 * 0,01$$

$$F_{Ro} = 69,85 \text{ N}$$

Estos resultados son indicados en la Tabla 4.28, especificándose la condición a la que cada uno corresponde y la variación existente entre ambos valores.

Tabla 4.28 Resistencia por rodadura con los diferentes paquetes de baterías

Condición	F_{Ro} (N)	Variación (%)
Paquete de baterías de fábrica	74,56	6,32
Módulos de baterías utilizados por Tesla	69,85	

Como se puede evidenciar, la disminución de peso del paquete de baterías al utilizar los módulos del Tesla Model S ocasiona que la resistencia a la rodadura se vea disminuida en un 6,32%, este corresponde a un factor importante de diseño ya que mediante una batería de mejor tecnología se tendrá una energía específica mayor, haciendo que el peso del paquete disminuya sin comprometer la capacidad energética. En la actualidad, las investigaciones en materia de baterías de litio se enfocan a mejorar este parámetro, así como también, la densidad de energía, los ciclos de vida y el impacto ambiental (O’Heir, 2017, pág. 656).

4.6.1.3 Resistencia por pendiente

Para cuantificar la magnitud de este tipo de resistencia se procede con el cálculo del ángulo de la pendiente a través de la Ecuación 3.14 y 3.15 utilizando la información del perfil de elevación del tramo de la ruta escogido. El tramo escogido corresponde a la parte inicial de la ruta de ensayo de autopista, tal como se indica en la Figura 4.36.

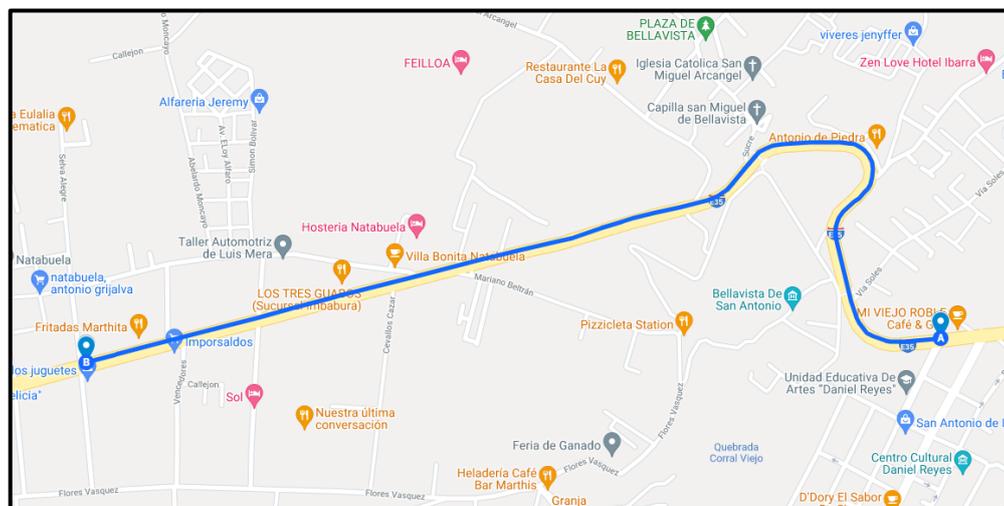


Figura 4.36 Tramo de ruta de autopista seleccionado para el análisis (Google Maps, 2021)

Este tramo fue escogido ya que su calzada es de tipo asfalto y se pueden tener diferentes velocidades de circulación lo que permitirá analizar la incidencia de todas estas variantes. Además, en el tramo seleccionado se tiene una diferencia de altura considerable entre el punto inicial (A) y el punto final (B), indicándose en la Tabla 4.29 los lugares de inicio, final y la longitud de este.

Tabla 4.29 Características del tramo de ruta de autopista seleccionado para el análisis

Inicio	Final	Longitud
Panamericana E-35 y Antonio José de Sucre	Panamericana E-35 y Selva Alegre	3,051 km

El perfil de elevación correspondiente a este tramo se muestra en la Figura 4.37, estableciéndose los valores de altura inicial de 2 315 m s. n. m. y final de 2 424 m s. n. m., teniendo una variación de altura de 109 m.



Figura 4.37 Perfil de elevación del tramo seleccionado para el análisis
(Google Earth, 2021)

El valor de la longitud por otra parte es obtenido mediante la Ecuación 3.15, tal como se indica a continuación.

$$b = \sqrt{c^2 - h^2} \quad [3.15]$$

Donde:

- b: Longitud [m]
- c: Distancia de recorrido [m]
- h: Variación de altura [m]

$$b = \sqrt{3\,051^2 - 109^2}$$

$$b = \sqrt{9\,308\,601 - 11\,881}$$

$$b = \sqrt{9\,296\,720}$$

$$b = 3\,049 \text{ m}$$

Una vez determinada la longitud se calcula el ángulo de la pendiente.

$$\alpha = \arctg \frac{h}{b} \quad [3.14]$$

Donde:

α : Ángulo de pendiente

h: Variación de altura [m]

b: Longitud [m]

$$\alpha = \arctg \left(\frac{109 \text{ m}}{3\,049 \text{ m}} \right)$$

$$\alpha = \arctg (0,0357)$$

$$\alpha = 2,047^\circ$$

La pendiente a su vez puede ser representada en porcentaje, correspondiendo los $2,047^\circ$ a una pendiente del 3,57%. Cabe recalcar que este ángulo de pendiente representa la totalidad del recorrido, ya que a lo largo de este se encontrarán diferentes valores de pendiente en función de la distancia, produciéndose distintos resultados de resistencia. Finalmente, se procede con la determinación de la resistencia por pendiente para ambos casos de estudio mediante la Ecuación 3.19.

$$F_p = m * g * \text{sen} (\alpha) \quad [3.19]$$

Donde:

F_p : Resistencia por pendiente [N]

m: Masa neta del vehículo [kg]

g: Valor de aceleración de la gravedad [m/s²]

α: Ángulo de la pendiente

$$F_p = 760 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2 * \text{sen} (2,047^\circ)$$

$$F_p = 266,36 \text{ N}$$

Una vez obtenido este valor correspondiente a la utilización del paquete de baterías de fábrica, se estima la resistencia por pendiente bajo el supuesto caso de reemplazarlo por los módulos de batería utilizados por Tesla.

$$F_p = 712 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2 * \text{sen} (2,047^\circ)$$

$$F_p = 249,54 \text{ N}$$

De esta manera, en la Tabla 4.30 se presentan estos resultados, así como también, la variación existente.

Tabla 4.30 Resistencia por pendiente del EV con los diferentes paquetes de baterías

Condición	F _p (N)	Variación (%)
Paquete de baterías de fábrica	266,36	6,32
Módulos de baterías del Tesla Model S	249,54	

Al igual que la resistencia por rodadura, la resistencia por pendiente disminuye por la rebaja de peso del paquete de baterías, indicándose un valor de 266,36 N con el paquete de fábrica y 249,54 N con el supuesto caso de reemplazarlo, mostrándose una disminución del 6,32%.

4.6.1.4 Potencia motor

La potencia del motor será la suma de las potencias por rodadura, pendiente y aerodinámica; dividida para la eficiencia de la transmisión. De esta manera, en la Figura 4.38 se establece la potencia requerida del motor para los dos casos de estudio y en función de la velocidad de circulación.

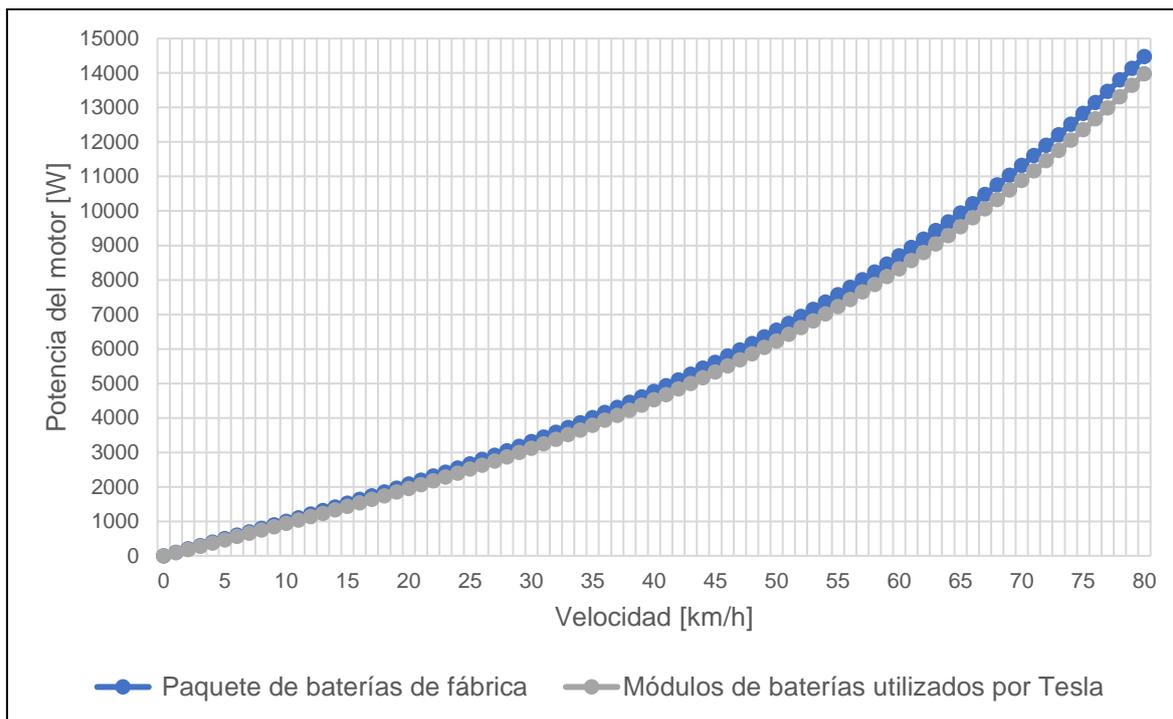


Figura 4.38 Potencia del motor en función de la velocidad con el paquete de baterías de fábrica y los utilizados por Tesla

De acuerdo con la anterior figura, la potencia del motor es directamente proporcional a la velocidad de circulación, estableciéndose que, con el paquete de baterías de fábrica a una velocidad de 80 km/h la potencia requerida es de 14 476,95 W, mientras que con los módulos de baterías utilizados por Tesla dicha potencia se sitúa en 13 978,53 W, viéndose reflejada una disminución del 3,44%.

Por otro lado, estos valores de potencia indican que conforme a las condiciones de pendiente, rodadura y aerodinámica planteadas, en situaciones reales el EV no podría circular a esta velocidad (80 km/h) debido a que la potencia máxima del motor de acuerdo con la ficha técnica es de 13 kW, haciendo falta 1,48 kW en el caso de ocupar las baterías originales y 0,98 kW en el supuesto de reemplazarlas.

La velocidad máxima a la que sí podría circular el vehículo bajo estas condiciones es 75 km/h con el paquete de baterías de fábrica y 77 km/h con los módulos de baterías utilizados por Tesla, ya que a estas velocidades se tiene una potencia del motor de 12 824,54 W y 12987,87 W, respectivamente.

En la Tabla 4.31 se detallan los valores de la pendiente de las dos curvas de potencia a diferentes intervalos de velocidad, viéndose reflejado en los dos casos que la pendiente es mayor en velocidades altas, lo cual determina que el incremento de la rapidez en este intervalo demandará más potencia del motor.

Tabla 4.31 Pendiente de curva de potencia motor según los intervalos de velocidad

Condición	Velocidad (km/h)	Pendiente
Paquete de baterías de fábrica	0-30	109,18
	30-60	178,63
	60-80	288,56
Módulos de baterías Tesla	0-30	102,95
	30-60	172,40
	60-80	282,33

4.6.1.5 Consumo

El consumo indica la cantidad de energía gastada por cada kilómetro recorrido. En la Figura 4.39 se indican los resultados referentes al consumo del EV con el paquete de baterías original y con los módulos de baterías de Tesla.

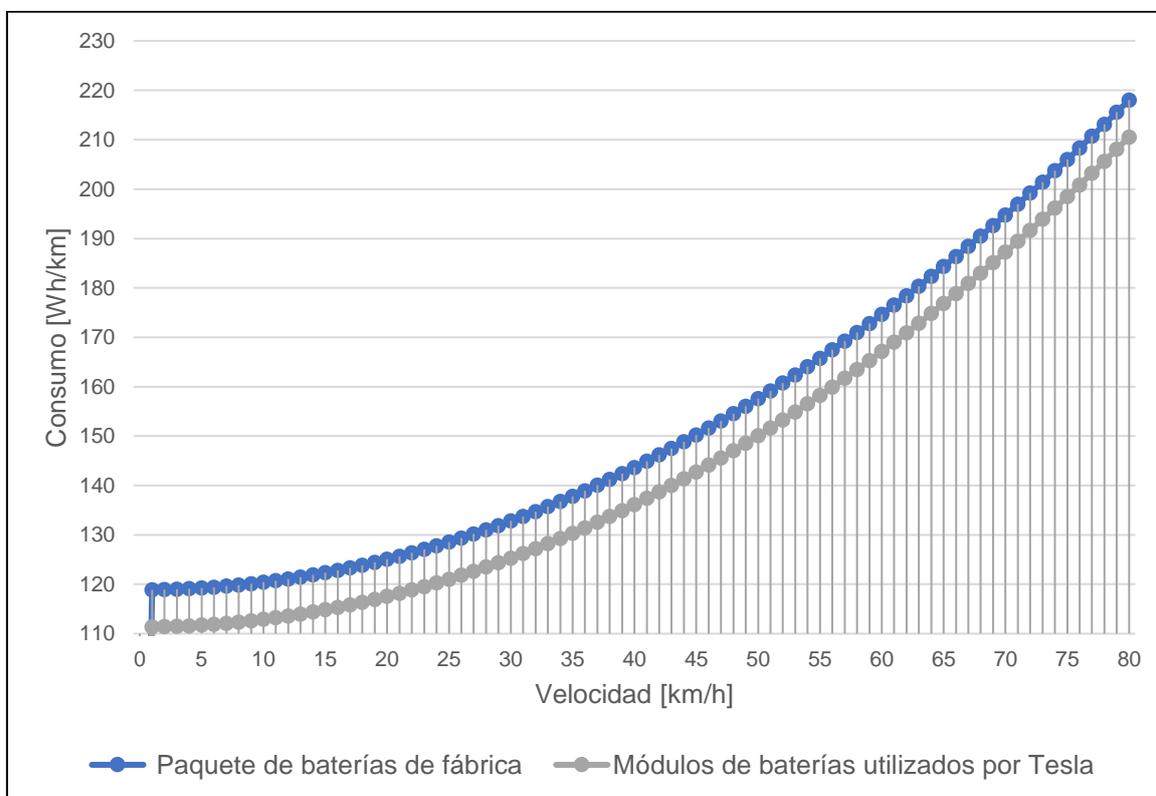


Figura 4.39 Consumo en función de la velocidad con el paquete de baterías de fábrica y los módulos de baterías de Tesla

De acuerdo con la figura anterior, el consumo es directamente proporcional con la velocidad de circulación, estableciéndose a 80 km/h con el paquete de baterías de fábrica un consumo de 218,03 Wh/km, mientras que con los módulos de baterías de Tesla 210,52 Wh/km, evidenciándose una disminución del 3,44%.

Por otro lado, el incremento de velocidad del 8% (70 a 80 km/h) hace que el consumo ascienda en un 11,93% en el caso del paquete de baterías de fábrica y un 12,41% en el de los módulos utilizados por Tesla, concluyendo que la velocidad tiene el mayor impacto sobre el consumo de energía del EV (Desreveaux et al., 2019, pág. 6).

De igual manera, se evidencian diferentes valores de pendiente de las curvas de acuerdo con la velocidad de circulación, lo cual indica que a velocidades altas el consumo aumentará en mayor proporción por cada km/h incrementado, tal como se muestra a continuación en la Tabla 4.32.

Tabla 4.32 Pendiente de curva de consumo según los intervalos de velocidad

Condición	Velocidad (km/h)	Pendiente
Paquete de baterías de fábrica	0-30	1,18
	30-60	1,39
	60-80	2,17
Módulos de baterías Tesla	0-30	1,14
	30-60	1,39
	60-80	2,17

4.6.1.6 Autonomía

Los resultados de autonomía que llegaría a tener el EV bajo las condiciones planteadas y los dos casos de análisis son mostrados en la Figura 4.40, indicándose estos valores en función de la velocidad.

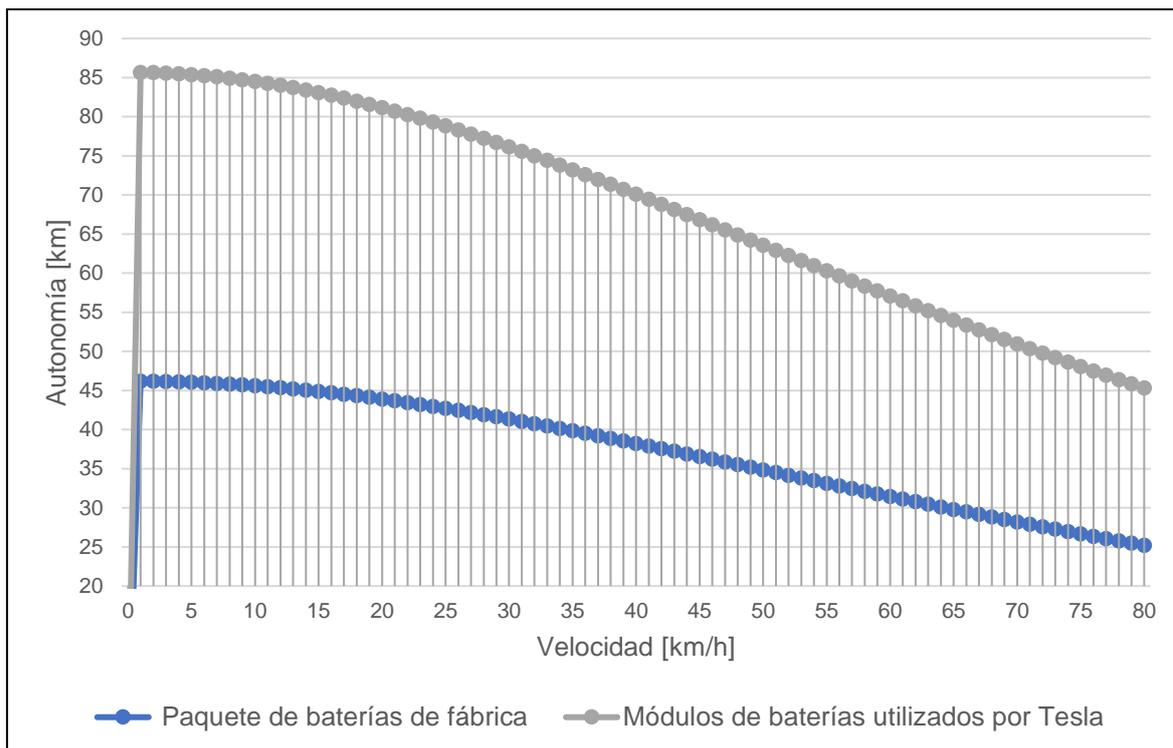


Figura 4.40 Autonomía en función de la velocidad con el paquete de baterías de fábrica y los módulos de baterías utilizados por Tesla

Como se puede identificar en la figura anterior, la autonomía es inversamente proporcional a la velocidad de circulación. Indicándose, en el caso de las baterías de fábrica un valor de autonomía de 46,19 km cuando se circula a la velocidad mínima (1 km/h) y de 25,18 km cuando se circule a la máxima (80 km/h). Mientras que, en el caso de los módulos empleados por Tesla se tiene una autonomía de 85,67 km a la velocidad mínima y 45,32 km cuando se circule a 80 km/h.

De la misma forma, es posible apreciar como a velocidades bajas la variación de autonomía entre los dos casos de estudio es mayor que a velocidades altas, mostrándose en la Tabla 4.33 la comparativa de los valores de autonomía al circular a una velocidad máxima, media y mínima.

Tabla 4.33 Autonomía máxima y mínima para las dos condiciones de estudio

Condición	Autonomía a 80 km/h	Autonomía a 50 km/h	Autonomía a 1 km/h
Paquete de baterías de fábrica	25,18 km	34,84 km	46,19 km
Módulos de baterías del Tesla Model S	45,32 km	63,56 km	85,67 km
Variación	79,97%	82,46%	85,48%

Conforme a lo antes expuesto se determina que el reemplazo del paquete de baterías de fábrica del EV por los módulos empleados por Tesla haría que la autonomía aumentase en un 85,48% cuando se circule a 1 km/h, en un 82,46% cuando se circule a 50 km/h, y en un 79,97% cuando se circule a 80 km/h. Este aumento considerable de autonomía se debe a que las baterías empleadas por Tesla poseen una mayor energía específica y densidad de energía, permitiendo el almacenamiento de mayor cantidad de energía sin comprometer el espacio ni el peso del conjunto. Esta cantidad de energía que es capaz de almacenar la batería corresponde a uno de los principales parámetros que determinan la autonomía de los EV (Speirs et al., 2014, pág. 185).

Cabe señalar también que, las dos curvas presentan diferentes valores de pendiente según los intervalos de velocidad, los cuales son presentados en la Tabla 4.34.

Tabla 4.34 Pendiente de curva de autonomía según los intervalos de velocidad

Condición	Velocidad (km/h)	Pendiente
Paquete de baterías de fábrica	0-20	-0,12
	20-60	-0,32
	60-80	-0,31
Módulos de baterías Tesla	0-20	-0,24
	20-60	-0,62
	60-80	-0,59

De la tabla anterior se establece que la pendiente de la curva resulta negativa para todos los intervalos, al ser la autonomía inversamente proporcional a la velocidad. Además, se puede evidenciar en las dos condiciones como la pendiente se torna más crítica en el intervalo de 20 a 60 km/h, indicando que a estas velocidades de circulación la autonomía decrecerá en considerables proporciones. De esta manera se determina que la velocidad de circulación corresponde a uno de los parámetros más influyentes en la autonomía del EV.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- La metodología propuesta en este trabajo para el análisis de la autonomía de un EV está compuesta por: el estudio de los patrones de movilidad, la determinación de la ruta de ensayo, la selección del vehículo e instrumentación, el levantamiento de datos en ruta, el procesamiento de la información y conformación del ciclo de conducción, el análisis de la autonomía del vehículo eléctrico y la definición de los parámetros que influyen en la autonomía; pudiendo ser empleada en investigaciones futuras relacionadas al consumo y rango de autonomía en este tipo de vehículos.
- El estudio de los patrones de movilidad de la ciudad de Ibarra desarrollado mediante el método de 4 etapas permitió zonificar la parte urbana del cantón en función de las parroquias, barrios y los centros de atracción de viaje; obteniendo como resultado 4 rutas con dos sentidos de circulación cada una, las cuales unidas conformaron la ruta urbana de ensayo que contó con una longitud de 17,3 km, cumpliendo lo establecido en los Ensayos de Conducción Real (RDE) respecto al trayecto.
- Las rutas de ensayo de tipo rural y de autopista no requirieron de un estudio de movilidad, puesto que los sectores y vías de circulación se encuentran bien delimitados en el cantón, además, no representan un esquema complejo de movilidad. De esta manera, se estableció una distancia de 17,6 km para la ruta rural y de 20 km para la de autopista, cumpliéndose en ambas, lo establecido en el Reglamento UE 2017/1151 para ensayos de conducción real (RDE).
- El ensayo de conducción bajo condiciones reales efectuado en la ruta de ensayo compuesta por la parte urbana, rural y de autopista tuvo una duración de 2 horas, 18 minutos y 31 segundos, durante los cuales se registraron 14 diferentes parámetros a una frecuencia de 1 Hz, mediante un scanner automotriz y un módulo GPS, dando un total de 116 354 datos almacenados. Toda esta información fue procesada y permitió la estimación de otras variables útiles en el estudio de la autonomía del EV.

- El ciclo de conducción combinado compuesto por el ciclo urbano, rural y de autopista tuvo una duración de 7 566 segundos, una velocidad promedio de 25,76 km/h y una distancia de 55 066 m. En cuanto a estados de conducción se refiere, este ciclo presentó una permanencia en aceleración del 35,64 %, en desaceleración del 35,04%, en parado del 15,26 % y en cruce del 14,06 %.
- De acuerdo con la prueba de descarga del EV se obtuvo una autonomía urbana de 73,35 km y un consumo energético de 83,17 Wh/km, lo cual supone una disminución del 26,65 % en la autonomía y un aumento del 32,02 % en el consumo, respecto a lo especificado por el fabricante. Esta variación se debe principalmente a los diferentes métodos de evaluación empleados, ya que en este estudio el EV fue sometido a condiciones reales de manejo en la ruta urbana de ensayo, mientras que el fabricante lo realiza mediante la aplicación del ciclo de conducción urbano ECE sobre un dinamómetro.
- Según lo analizado en un tramo del recorrido se establece que cuando el EV asciende una pendiente del 5,36 %, la autonomía describe una reducción del 16,62 %, presentándose durante este período altas velocidades de circulación y el accionamiento del pedal del acelerador durante la mayoría del tiempo. Lo contrario ocurre cuando se desciende hasta la altura inicial con una pendiente negativa del 4,74%, identificándose que durante la mayor parte del descenso la posición de pedal del acelerador es cero, lo que supone la operación del sistema de frenado regenerativo, el cual fue capaz de recuperar el 12,35 % de la autonomía, es decir, únicamente el 74,21 % de la energía gastada durante el ascenso.
- El análisis de la dinámica vehicular evidenció que una inclinación del 3,57 % haría que el EV experimente una resistencia por pendiente de 266,36 N, incidiendo directamente en el consumo y por tanto, en la autonomía. De esta manera, la pendiente corresponde a un factor influyente en la evaluación del rango de autonomía de un vehículo, relacionándose directamente con el dimensionamiento de trenes de potencia.
- La velocidad de circulación es el parámetro que más influye en el consumo de energía, mostrándose un aumento del 11,93 % en este, cuando la velocidad se incrementa en un 8 %. Además se establece que el máximo consumo se produce cuando se circula a la máxima velocidad, indicándose a esta velocidad un consumo energético de 218,03 Wh/km.

- La tecnología de las baterías es también uno de los parámetros de mayor influencia en la autonomía, puesto que con módulos de baterías 18650, los cuales cuentan con una capacidad de 5,3 kWh, una energía específica de 212 Wh/kg y densidad de energía de 297,29 kWh/m³, se puede aumentar la autonomía del EV entre un 79,97% a un 85,48 %, dependiendo de la velocidad a la que se circule.
- Al haber sido la velocidad el parámetro de mayor influencia en el consumo, también lo fue en la autonomía, dando mayor relevancia a este factor sobre la tecnología de la batería y la pendiente, ya que, en este, el conductor puede incidir directamente gestionando la energía del EV en función de sus requerimientos.

5.2 RECOMENDACIONES

- En investigaciones futuras en donde se requiera almacenar información sobre la cinemática del automóvil, se recomienda el uso del dispositivo GPS GL-770 al permitir la configuración, registro y exportación de los datos de manera fácil y dinámica mediante el software provisto por el mismo fabricante.
- En estudios posteriores que involucren el análisis de los parámetros de funcionamiento del automóvil se recomienda emplear un datalogger OBD II compatible con el vehículo, a fin de que el flujo de datos sea registrado automáticamente en un archivo para su posterior lectura.
- Si se desea analizar los aspectos energéticos del EV de una manera más precisa se recomienda utilizar un analizador de energía específico para este tipo de vehículos, tomando en cuenta que el paquete de baterías del EV utilizado en este estudio es capaz de generar picos de voltaje y corriente superiores a los 55 voltios y 150 amperios, respectivamente.
- En estudios donde se precise analizar a profundidad la incidencia del tráfico sobre la autonomía se recomienda realizar las pruebas de descarga en días entre semana en horas pico y valle, permitiendo abarcar un mayor espectro del comportamiento respecto a la circulación vehicular.
- En trabajos futuros referentes al estudio de la autonomía de un EV se recomienda tomar en consideración parámetros como: la temperatura, corriente de descarga, y el estado de salud del paquete de baterías, los cuales no fueron analizados en este estudio debido a la falta de equipos de medición.
- Para futuras investigaciones relacionadas a pruebas de emisiones, consumo y autonomía en vehículos, se pueden utilizar tanto las rutas como los ciclos de conducción desarrollados en el presente estudio, los cuales están basados en condiciones reales de la ciudad de Ibarra.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACEA - European Automobile Manufacturers' Association. (2019). *The Benefits of WLTP*. https://www.wltpfacts.eu/wp-content/uploads/2017/04/WLTP_Leaflet_FA_web.pdf
2. AEADE. (2020). *Anuario 2019*. Asociación de Empresas Automotrices Del Ecuador.
3. Argue, C. (2020). *¿En qué medida afecta la temperatura a la autonomía de los vehículos eléctricos?* <https://www.geotab.com/es/blog/temperatura-autonomia-vehiculos-electricos/>
4. Barlow, T., Latham, S., Mccrae, I., & Boulter, P. (2009). A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions. *TRL Published Project Report*, 280. http://www.trl.co.uk/online_store/reports_publications/trl_reports/cat_traffic_and_the_environment/report_a_reference_book_of_driving_cycles_for_use_in_the_measurement_of_road_vehicle_emissions.htm%5Cnhttps://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/a
5. Barreno-Vereau, E., Cabrera-Gil-Grados, E., & Millones-Rivalles, R. (2008). Metodología de modelamiento de un sistema de transporte urbano. *Ingeniería Industrial*, 0(026), 11. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2008.n026.633>
6. Bielaczyc, P., Szczotka, A., & Woodburn, J. (2019). Carbon dioxide emissions and fuel consumption from passenger cars tested over the NEDC and WLTC – an overview and experimental results from market-representative vehicles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 214, 12136. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012136>
7. Bielaczyc, P., & Woodburn, J. (2019). Trends in Automotive Emission Legislation: Impact on LD Engine Development, Fuels, Lubricants and Test Methods: a Global View, with a Focus on WLTP and RDE Regulations. *Emission Control Science and Technology*, 5(1), 86–98. <https://doi.org/10.1007/s40825-019-0112-3>

8. Bingley, L. (2017). True lies. *Electric & Hybrid Vehicle Technology International*, January.
9. Bueno Juela, C. M., & Quizhpe Sinchire, J. C. (2017). *Determinación de la autonomía real del vehículo eléctrico en la ciudad de cuenca mediante análisis experimental*. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14729/1/UPS-CT007234.pdf>
10. Calva, R., & Flores, A. (2020). *Obtención del ciclo de conducción urbano para la ciudad de Riobamba en horas pico y no pico mediante la recolección de datos de los factores de operación y consumo energético obtenido por un dispositivo OBD II*. ESPOCH.
11. Chan, C. C. (2007). The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95, 704–718. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2007.892489>
12. Chan, H., & Sutanto, D. (2000). A new battery model for use with battery energy storage systems and electric vehicles power systems. In *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1109/PESW.2000.850009>
13. Chau, K. T., & Wong, Y. S. (2002). Overview of power management in hybrid electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 43(15), 1953–1968. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00148-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00148-0)
14. Chin, C. S., Gao, Z., Woo, W. L., Jia, J., & Toh, W. (2015). *Lithium-ion Battery Modeling and Validation for Smart Power System*. <https://doi.org/10.1109/I4CT.2015.7219579>
15. Choi, Y., Lee, J., Jang, J., & Park, S. (2019). Effects of fuel-injection systems on particle emission characteristics of gasoline vehicles. *Atmospheric Environment*, 217(February), 116941. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116941>
16. Closs, D., & Bixby, C. (2007). Administración y logística en la cadena de suministro. *Michigan: McGraw-Hill*.
17. Cuesta, G. (2017). *Caracterización del tren de potencia de un vehículo eléctrico de*

categoría L7 tipo Smart.

18. Cueva Sánchez, E. J., Lucero, J., Guzman, A., Rocha, J., & Espinoza, L. (2018). Revisión del estado del arte de baterías para aplicaciones automotrices. *Enfoque UTE*, 9(1), 166–176. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n1.202>

19. Danko, M., Adamec, J., Taraba, M., & Drgona, P. (2019). ScienceDirect ScienceDirect Overview of batteries State of Charge estimation methods Overview of batteries State of Charge estimation methods. *Transportation Research Procedia*, 40, 186–192. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.029>

20. Davari, M. M., Jerrelind, J., & Stensson Trigell, A. (2017). Energy efficiency analyses of a vehicle in modal and transient driving cycles including longitudinal and vertical dynamics. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 53, 263–275. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.04.019>

21. Desreveaux, A., Bouscayrol, A., Trigui, R., Castex, E., & Klein, J. (2019). Impact of the Velocity Profile on Energy Consumption of Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(12), 11420–11426. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2949215>

22. Dirección de Planificación y Desarrollo Territorial. (2020). Actualización Del Plan De Desarrollo Y Ordenamiento Territorial Del Cantón Ibarra. *GADM de Ibarra*, 99.

23. Duque, D. A., & Rocano, J. A. (2017). *Determinación de la autonomía del vehículo eléctrico mediante ciclos controlados*. 167.

24. Durán, C. E., Restrepo, D. M., & Morales, L. F. (2019). Sustainable transport and housing market. An analysis for Medellín city. *Desarrollo y Sociedad*, 2019(83), 145–183. <https://doi.org/10.13043/dys.83.4>

25. Fatima Brondani, M. de, Sausen, A. T. Z. R., Sausen, P. S., & Binelo, M. O. (2018). Parameter estimation of lithium ion polymer battery mathematical model using genetic algorithm. *Computational and Applied Mathematics*, 37, 296–313.

<https://doi.org/10.1007/s40314-017-0537-7>

26. Fernández, E., & Coello, M. (2015). El Vehículo Eléctrico Análisis de su Infraestructura de Carga y su Integración a una Smart Grid. *Congreso Internacional Sostenibilidad Energética, May 2016*, 7.
27. García, J. I. R. (2017). *Sistemas de transmisión y frenado*. Macmillan Education.
<https://books.google.com.ec/books?id=rvURzQEACAAJ>
28. *GL-770 / GL-770M Quick Guide*. (n.d.).
29. Gong, H., Zou, Y., Yang, Q., Fan, J., Sun, F., & Goehlich, D. (2018). Generation of a driving cycle for battery electric vehicles : A case study of Beijing. *Energy, 150*, 901–912. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.092>
30. Goodenough, J. B. (2018). How we made the Li-ion rechargeable battery: Progress in portable and ubiquitous electronics would not be possible without rechargeable batteries. John B. Goodenough recounts the history of the lithium-ion rechargeable battery. *Nature Electronics, 1*(3), 204. <https://doi.org/10.1038/s41928-018-0048-6>
31. Google Earth. (2021). *Google Earth*.
32. Google Maps. (2021). *Google Maps*.
33. Hu, B., Yang, J., Li, J., Li, S., & Bai, H. (2019). Intelligent control strategy for transient response of a variable geometry turbocharger system based on deep reinforcement learning. *Processes, 7*(9). <https://doi.org/10.3390/pr7090601>
34. Huynh, T. A., & Hsieh, M. F. (2018). Performance analysis of permanent magnet motors for electric vehicles (EV) traction considering driving cycles. *Energies, 11*(6). <https://doi.org/10.3390/en11061385>
35. INEC. (2010). Fascículo provincial Imbabura. *Resultados Del Censo 2010 de La Población y Vivienda En El Ecuador*, 8.

36. Irene, E., Farnham, J., De, A. C., & Jaimez, E. I. (2019). *Análisis comparativo de elementos del tren de potencia de vehículos electricos de clase m y n*.
37. Jaafar, Abdul Hassan, & Rahman, A. (2020). EMA-CVT Performance for UDDS and HWFET Cycles with Fuzzy Logic Approach. *Test Engineering and Management*, 83, 13775–13781.
38. Jusoh, M. A., & Daud, M. Z. (2017). Particle swarm optimisation-based optimal photovoltaic system of hourly output power dispatch using Lithium-ion batteries. *JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING AND SCIENCES*, 11, 278–2793. <https://doi.org/10.15282/jmes.11.3.2017.1.0252>
39. Kappler, F. (2017). A New Standard “An overview of WLTP for passenger cars and light commercial vehicles.” In *Volkswagen AG* (Vol. 12, Issue 1, pp. 1–8). <https://doi.org/10.1177/10454411010120030201>
40. Karabasoglu, O., & Michalek, J. (2013). Influence of driving patterns on life cycle cost and emissions of hybrid and plug-in electric vehicle powertrains. *Energy Policy*, 60, 445–461. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.03.047>
41. Karavalakis, G., Short, D., Hajbabaei, M., Vu, D., Villela, M., Russell, R., Durbin, T., & Asa-Awuku, A. (2013). Criteria Emissions, Particle Number Emissions, Size Distributions, and Black Carbon Measurements from PFI Gasoline Vehicles Fuelled with Different Ethanol and Butanol Blends. In *SAE Technical Papers* (Vol. 2). <https://doi.org/10.4271/2013-01-1147>
42. Karim, M., Furnaz, S., Buksh, A. R., Beg, M. A., Khan, M. S., & Moiz, B. (2019). Sample Size Calculation in Medical Research. *MACS 2019 - 13th International Conference on Mathematics, Actuarial Science, Computer Science and Statistics, Proceedings*, 2(8), 217–224. <https://doi.org/10.1109/MACS48846.2019.9024807>
43. Keynes, A. (2021). *Car CO2 review: Europe’s chance to win the e-mobility race*.
44. Lach, J., Wróbel, K., Wróbel, J., Podsadni, P., & Czerwiński, A. (2019). Applications of

- carbon in lead-acid batteries: a review. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 23(3), 693–705.
45. Larminie, J., & Lowry, J. (2003). *Electric Vehicle Technology Explained*. <https://doi.org/10.1002/0470090707>
46. Lata, L., & Quintuña, H. (2018). *Análisis de Influencia del Grado de Pendiente en Autonomía de VE*. UPS Cuenca.
47. Launch. (2013). *X-431 PRO 3. User's manual*.
48. Lipu, M. S. H., Hannan, M. A., Hussain, A., Hoque, M. M., Ker, P. J., Saad, M. H. M., & Ayob, A. (2018). A review of state of health and remaining useful life estimation methods for lithium-ion battery in electric vehicles: Challenges and recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 205, 115–133. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.065>
49. Ma, Z., Yang, R., & Wang, Z. (2019). A novel data-model fusion state-of-health estimation approach for lithium-ion batteries. *Applied Energy*, 237(July 2018), 836–847. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.071>
50. Maldonado, E., & Martínez, C. (2018). *Investigación del proceso de carga (SOC) y de descarga (DSOC) de las baterías de alta tensión para estimar su eficiencia y tiempo de vida útil a través de un módulo de corriente constante*. 72.
51. Manuel, L., Pérez, P., & Becerra, O. (2010). *Impacto De La Nueva Fórmula De La Densidad Del Aire Cipm-2007*. 3–7.
52. Marchese, R. A., & Golato, M. (2011). El Consumo de Combustible y Energía en el Transporte. *Revista CET/UNTucuman*, 33, 1–9.
53. Martínez-Lao, J., Montoya, F. G., Montoya, M. G., & Manzano-Agugliaro, F. (2017). Electric vehicles in Spain: An overview of charging systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77(November), 970–983.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.239>

54. Méndez Torres, P. W., Gómez Berrezueta, M. F., & Llerena Mena, A. F. (2020). Análisis de la viabilidad para la implementación de vehículo eléctrico que preste servicio de taxi en la ciudad de Cuenca. *INNOVA Research Journal*, 5(3.2), 295–308. <https://doi.org/10.33890/innova.v5.n3.2.2020.1612>
55. Mi, C., & Masrur, M. A. (2017). *Hybrid electric vehicles: principles and applications with practical perspectives*. John Wiley & Sons.
56. Ministerio de Producción Comercio Exterior Inversiones y Pesca. (2019). *Reducción arancelaria a vehículos eléctricos, baterías y cargadores para vehículos eléctricos promoviendo el acceso a movilidad limpia y moderna*. <https://www.produccion.gob.ec/reduccion-arancelaria-a-vehiculos-electricos-baterias-y-cargadores-para-vehiculos-electricos-promoviendo-el-acceso-a-movilidad-limpia-y-moderna/>
57. Nikowitz, M. (2016). *Advanced Hybrid and Electric Vehicles: System Optimization and Vehicle Integration*. <https://link--springer--com.ual.debiblio.com/book/10.1007%2F978-3-319-26305-2>
58. O’Heir, J. (2017). Building better batteries. *Mechanical Engineering*, 139(1), 10–11.
59. *Open Vehicle Monitoring System*. (2019). 1, 1–77. <https://www.openvehicles.com/>
60. Padilla-Padilla, C. A., Buenaño-Moyano, L. F., Cuaical-Angulo, B. A., Ramos-Flores, J. M., Sánchez-Chávez, L. H., & Caicedo-Reyes, J. I. (2018). Aplicación del grafeno en baterías para vehículos eléctricos. *Polo Del Conocimiento*, 3(6), 307. <https://doi.org/10.23857/pc.v3i6.579>
61. Pañero, E. (2019). Tipos de conectores en los vehículos eléctricos. *Mecánica y Electrónica*.
62. Parapi, J., & Pesantez, G. (2020). *Implementación de un sistema generador de carga*

eléctrica, utilizando paneles solares, para el incremento de la autonomía de un vehículo eléctrico Kia Soul (UPS (Ed.)).

63. *Plan de Movilidad Sustentable del cantón Ibarra.* (2015).
64. Quinchimbla, F., & Solís, J. (2017). *Desarrollo de ciclos de conducción en la ciudad, carretera y combinado para evaluar el rendimiento real del combustible de un vehículo con motor de ciclo Otto en el D.M.Q.* Escuela Politécnica Nacional.
65. Quiñones, F., Milocco, R. H., & Real, S. G. (2020). Algoritmos de Monitoreo para Baterías Recargables. *Ajea*, 5. <https://doi.org/10.33414/ajea.5.663.2020>
66. Quiroga Persivale, G. (2016). *El porqué en la innovación: el caso Tesla.*
67. *Reglamento UE 2017/1151.* (2017). 4, 1–643.
68. Reinoso, L., & Ortega, J. (2020). *Incremento de la autonomía de un vehículo eléctrico Dayang CHOK-S mediante paneles solares Increasing the autonomy of a Dayang CHOK-S electric vehicle through solar panels* *Introducción Metodología.* 3(2).
69. Renault. (2018). *Renault Twizy* (p. 7).
70. Rivadeneira, D. J. (2021). “*Proyecto De Factibilidad Sobre La Implementación De Vehículos Eléctricos Para Transporte Personal Entre Los Camp/ús De La Universidad Técnica Del Norte.*”
71. Rojas Quezada, C., Martínez Bascuñán, M., De la Fuente Contreras, H., Schäfer Faulbaum, A., Aguilera Saéz, F., Fuentes Mella, G., Peyrín Fuentes, C., & Carrasco Montagna Cruz, J. (2019). Accesibilidad a equipamientos según movilidad y modos de transporte en una ciudad media, Los Ángeles, Chile. *Anales de Geografía de La Universidad Complutense*, 39(1), 177–200. <https://doi.org/10.5209/aguc.64682>
72. Rus, C. (2020). *CATL dice tener lista su batería con una vida útil de 2 millones de km.*

73. SENPLADES. (2017). Plan Nacional del Buen vivir 2017-2021. *Educational Research*, 1, 150. <http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/07/Plan-Nacional-para-el-Buen-Vivir-2017-2021.pdf>
74. SERNAUTO. (2017). *Evolución de la reglamentación europea sobre emisiones y reglamentación de los vehículos*. 26.
75. Shen, P., Zhao, Z., Li, J., & Zhan, X. (2018). Development of a typical driving cycle for an intra-city hybrid electric bus with a fixed route. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 59, 346–360. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.01.032>
76. Sociedad de Técnicos de Automoción (STA). (2011). *El Vehículo Eléctrico, Desafíos Tecnológicos infraestructuras y oportunidades de negocio* (Primera Ed). Librook.
77. Solaris Technology Industry. (2021). *No Title*.
78. Sovacool, B. K. (2017). Experts, theories, and electric mobility transitions: Toward an integrated conceptual framework for the adoption of electric vehicles. *Energy Research and Social Science*, 27, 78–95. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.02.014>
79. Speirs, J., Contestabile, M., Houari, Y., & Gross, R. (2014). The future of lithium availability for electric vehicle batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 183–193. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.018>
80. Suarez-Bertoa, R., Valverde, V., Clairotte, M., Pavlovic, J., Giechaskiel, B., Franco, V., Kregar, Z., & Astorga, C. (2019). On-road emissions of passenger cars beyond the boundary conditions of the real-driving emissions test. *Environmental Research*, 176(July), 108572. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108572>
81. Sundén, B. (2019). *Thermal management of batteries* (B. B. T.-H. Sundén Batteries and Fuel Cells (Ed.); pp. 93–110). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816950-6.00006-3>

82. Tamura, A., Ishibashi, T., & Kawamura, A. (2019). EV Range Extender in a Two-Battery HEECS Chopper-Based Powertrain. *World Electric Vehicle Journal*, 10, 19. <https://doi.org/10.3390/wevj10020019>
83. Tesla battery Module Controller. (2017). *EVTV Monitor / Controller For Tesla Model S Battery Modules*. 3.
84. Tian, H., Qin, P., Li, K., & Zhao, Z. (2020). A review of the state of health for lithium-ion batteries: Research status and suggestions. *Journal of Cleaner Production*, 261, 120813. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120813>
85. Vargas, Á. A., Ortega, J. M. M., & Hernández, F. N. (2018). *Propuestas para el fomento de la movilidad eléctrica: Barreras identificadas y medidas que se deberían adoptar*.
86. Vasconcellos, E. A. (2019). Contribuciones a un gran impulso ambiental para América Latina y el Caribe, movilidad urbana sostenible. *Comisión Económica Para América Latina y El Caribe*, 1(N/A), 88. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44668/1/S1801160_es.pdf
87. Vynakov, O. F., Savolova, E. V., & Skrynnyk, A. I. (2016). Modern Electric Cars of Tesla Motors Company. *Automation of Technological and Business Processes*, 8(2), 9–18. <https://doi.org/10.15673/atbp.v8i2.162>
88. Wang, Q., Mao, B., Stoliarov, S. I., & Sun, J. (2019). A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 73, 95–131. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.03.002>
89. Wang, Z., Zeng, S., Guo, J., & Qin, T. (2019). State of health estimation of lithium-ion batteries based on the constant voltage charging curve. *Energy*, 167, 661–669. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.008>
90. Xiong, S., Wang, Y., Bai, B., & Ma, X. (2020). A hybrid life cycle assessment of the large-scale application of electric vehicles. *Energy*, 119314. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119314>

91. Yu, H., Tseng, F., & McGee, R. (2012). Driving pattern identification for EV range estimation. *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference, IEVC 2012*. <https://doi.org/10.1109/IEVC.2012.6183207>
92. Zelinsky, M. A., Koch, J. M., & Young, K. H. (2018). Performance comparison of rechargeable batteries for stationary applications (Ni/MH vs. Ni–Cd and VRLA). *Batteries*, *4*(1), 1–7. <https://doi.org/10.3390/batteries4010001>
93. Zhang, R., Xia, B., Li, B., Cao, L., Lai, Y., Zheng, W., Wang, H., & Wang, W. (2018). State of the art of lithium-ion battery SOC estimation for electrical vehicles. *Energies*, *11*(7). <https://doi.org/10.3390/en11071820>
94. Zhao, X., Zhao, X., Yu, Q., Ye, Y., & Yu, M. (2020). Development of a representative urban driving cycle construction methodology for electric vehicles: A case study in Xi'an. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *81*, 102279. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102279>

ANEXOS

ANEXO I

FORMATO DE ENCUESTA ORIGEN-DESTINO ONLINE

Encuesta origen destino de la población de la ciudad de Ibarra ☺

Por favor, responda a las siguientes preguntas referentes a viajes realizados en los últimos 7 días:

Sección 1

Describa el viaje que usted haya realizado entre semana (lunes a viernes).

1. Seleccione el sector dónde inició su viaje (Origen) *

2. Seleccione el sector dónde terminó su viaje (Destino) *

3. ¿Cuántas veces entre semana (lunes a viernes) realizó el recorrido antes descrito? *

- Una sola vez
- 2 veces
- 3 veces
- 4 veces
- 5 o más veces

4. ¿Cuál fue el propósito del viaje? *

- Estudios
- Compras
- Atención médica, salud
- Trabajo
- Visitar amigos o familiares
- Ocio, recreación, vacaciones

5. ¿Qué medio de transporte utilizó para desplazarse? *

- Vehículo particular
- Autobús
- Taxi

6. ¿Ha realizado algún viaje el fin de semana (sábado y domingo)? *

- Sí
- No

Sección 2

Describa el viaje que usted haya realizado el último fin de semana.

7. Seleccione el sector dónde inició su viaje (Origen) *

8. Seleccione el sector dónde terminó su viaje (Destino) *

9. ¿Cuántas veces (en el fin de semana) se realizó el recorrido antes descrito? *

- Una sola vez
- 2 o más veces

10. ¿Cuál fue el propósito del viaje? *

- Estudios
- Compras
- Atención médica, salud
- Trabajo
- Visitar amigos o familiares
- Ocio, recreación, vacaciones

11. ¿Qué medio de transporte utilizó para desplazarse? *

- Vehículo particular
- Autobús
- Taxi

12. ¿Además del viaje antes descrito, ha realizado alguno más en los últimos 7 días? *

- Sí
- No

Sección 3

Describa el viaje que usted haya realizado en los últimos 7 días.

13. Seleccione el sector dónde inició su viaje (Origen) *

Selecciona la respuesta 

14. Seleccione el sector dónde terminó su viaje (Destino) *

Selecciona la respuesta 

15. ¿Cuántas veces a la semana se realizó el recorrido antes descrito? *

- 1 sola vez
- 2 veces
- 3 veces
- 4 veces
- 5 veces
- 6 veces
- 7 veces o más

16. ¿Cuál fue el propósito del viaje? *

- Estudios
- Compras
- Atención médica, salud
- Trabajo
- Visitar amigos o familiares
- Ocio, recreación, vacaciones

17. ¿Qué medio de transporte utilizó para desplazarse? *

- Vehículo particular
- Autobús
- Taxi

ANEXO II

FICHA TÉCNICA RENAULT TWIZY

Carlab

Ficha técnica

Toda la información para conocer a tu Twizy

	TWIZY Cargo 1	TWIZY Technic 2
Número de pasajeros	1	2
Emisiones CO2	Cero emisiones: 100% eléctrico	Cero emisiones: 100% eléctrico
Motor		
Potencia kW CEE (cv)	13 (17)	13 (17)
par máx. Nm CEE (m.kg)	57	57
Régimen par máx. (r.p.m.)	de 0 a 2.100	de 0 a 2.100
Prestaciones		
Velocidad máxima (km/h)	80	80
0-45 km / h (s)	6,1	6,1
30-60 km / h (s)	8,1	8,1
Consumo ciclo urbano ece-15		
CO2 (g / km)	0	0
Autonomía certificada* ECE-15 (km)	100	100
Wh / kmA	63	63
Dirección		
Ø de giro entre aceras (m)	6,8	6,8
Número de giros del volante	2,8	2,8
Trenes		
Tipo tren delantero / tren trasero	Pseudo-Mc Pherson Combinado muelle / amortiguador Delantera y trasera: diámetro 23 mm	
Ruedas y neumáticos		
Rines (")**	13	13
Dimensiones neumáticos delanteros**	125 / 80 R13	125 / 80 R13
Dimensiones neumáticos traseros**	145 / 80 R13	145 / 80 R13
Frenos		
Discos delanteros plenos (Ø en mm)	214	214
Discos traseros plenos (Ø en mm)	204	204
Pesos (kg)		
En vacío en orden de marcha (sin batería)	474 (375)	474 (375)
En vacío en orden de marcha delante	206	206
En vacío en orden de marcha atrás	268	268
Total (MTR)	690	690
Carga útil (CU)	115	115

*La autonomía medida y certificada por la UTAC del vehículo en ciclo ECE-15 es de 100 km para Twizy. Al igual que el consumo de carburante de un vehículo térmico, en uso real, la autonomía de Twizy depende de diferentes variables. La autonomía real puede variar en función de las condiciones de uso (tipo de trayecto, velocidad, estilo de conducción, utilización de equipamientos que consume energía, etc.). Según el estilo de conducción, la autonomía real de Twizy es de 50 a 80 km.

**El vehículo no está provisto de una rueda de repuesto. En caso de pinchazo, se puede solicitar a través de la línea de Renault Asistencia el traslado gratuito hasta un servicio de montallantas, durante la vigencia de la garantía.

ANEXO III

GRÁFICAS DE AUTONOMÍA EN FUNCIÓN DE LOS PARÁMETROS REGISTRADOS

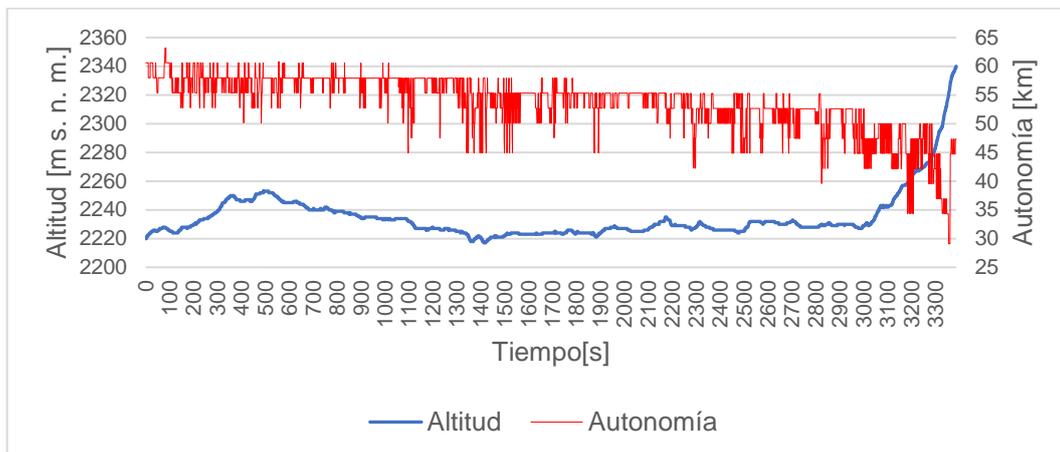


Figura AII.1 Altitud vs. Autonomía en ruta urbana

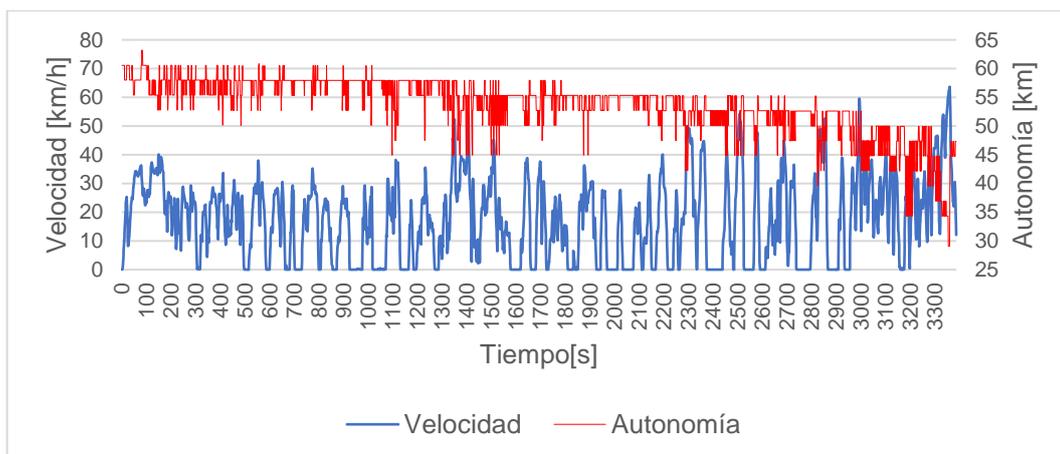


Figura AII.2 Velocidad vs. Autonomía en ruta urbana

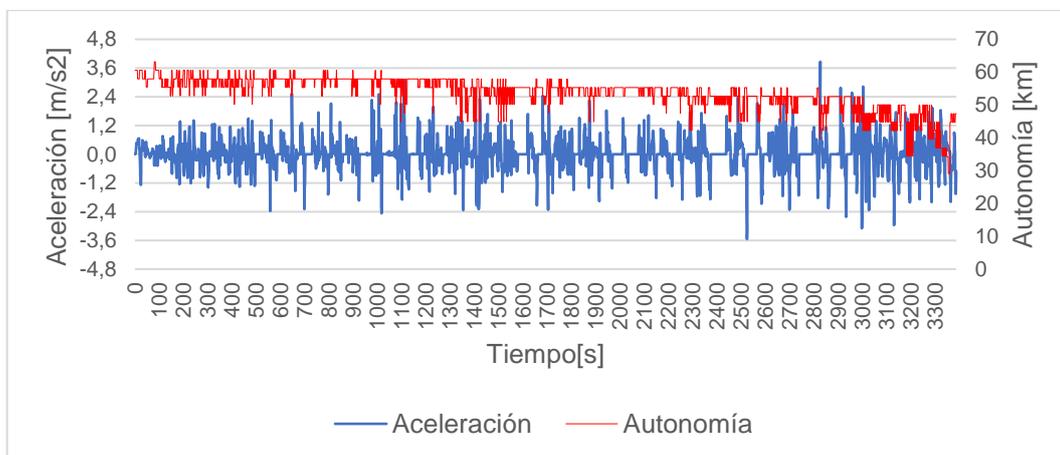


Figura AII.3 Aceleración vs. Autonomía en ruta urbana

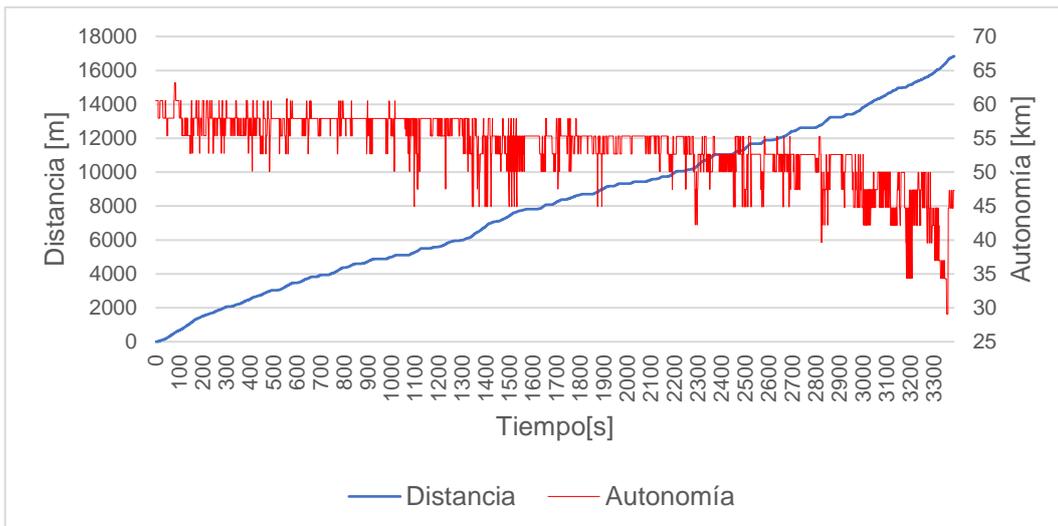


Figura AII.4 Distancia vs. Autonomía en ruta urbana

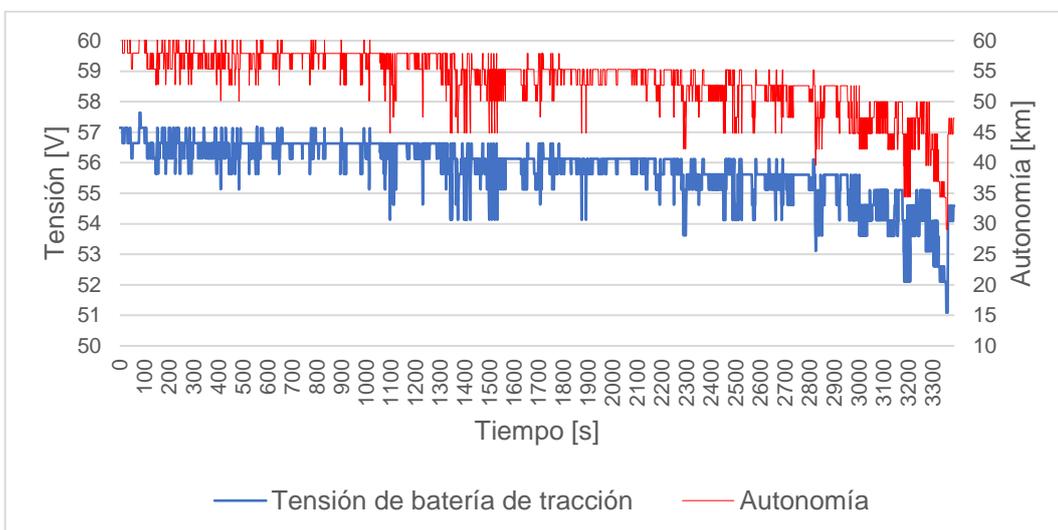


Figura AII.5 Tensión batería de tracción vs. Autonomía en ruta urbana

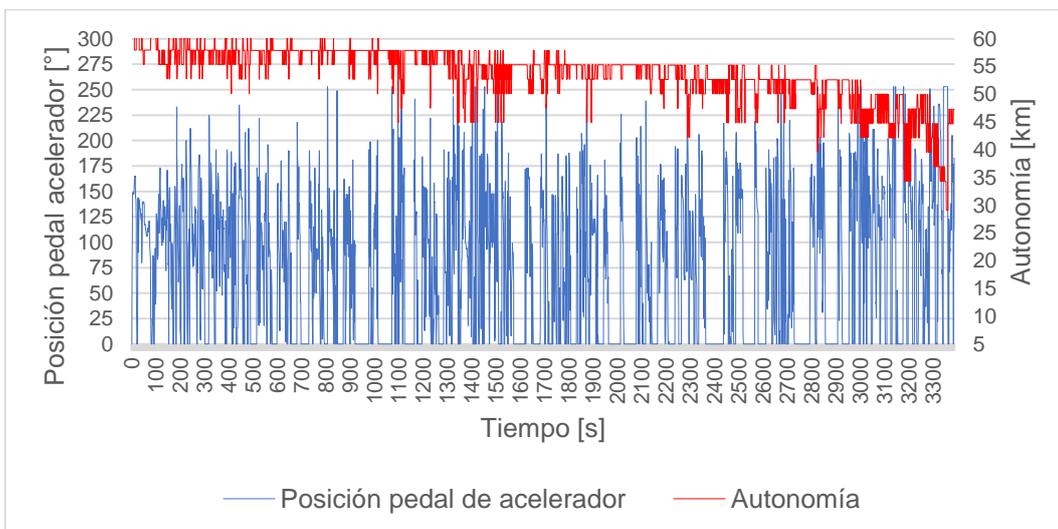


Figura AII.6 Posición pedal del acelerador vs. Autonomía en ruta urbana

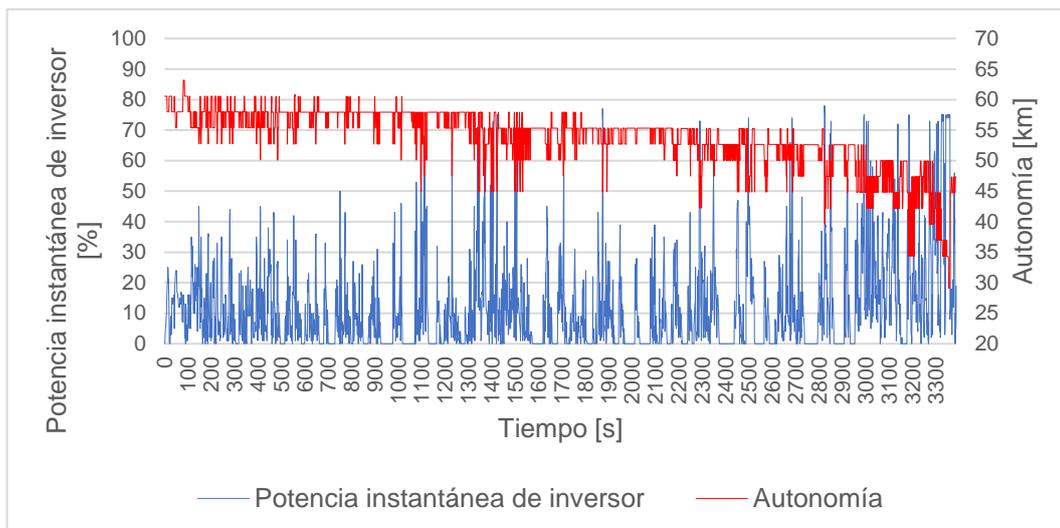


Figura AII.7 Potencia instantánea de inversor vs. Autonomía en ruta urbana

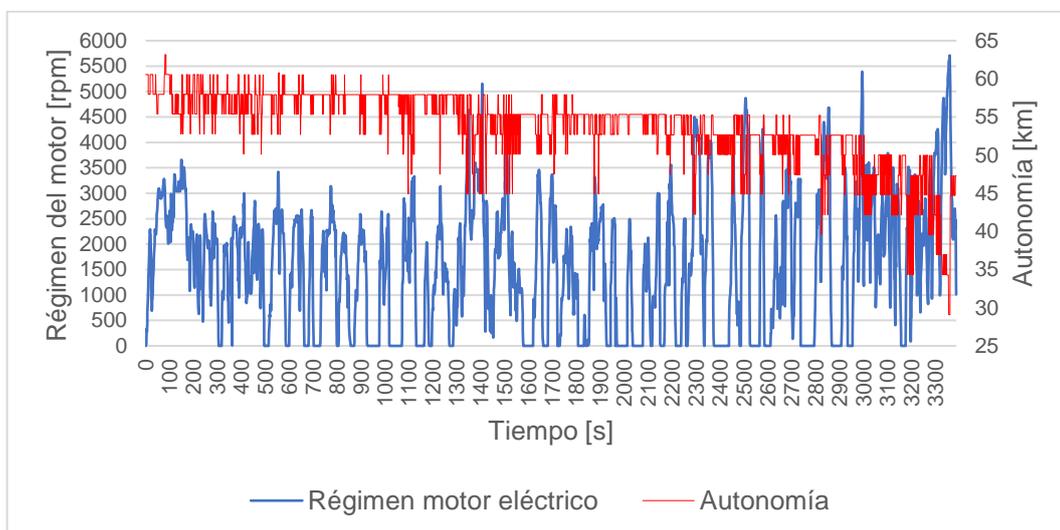


Figura AII.8 Régimen del motor vs. Autonomía en ruta urbana

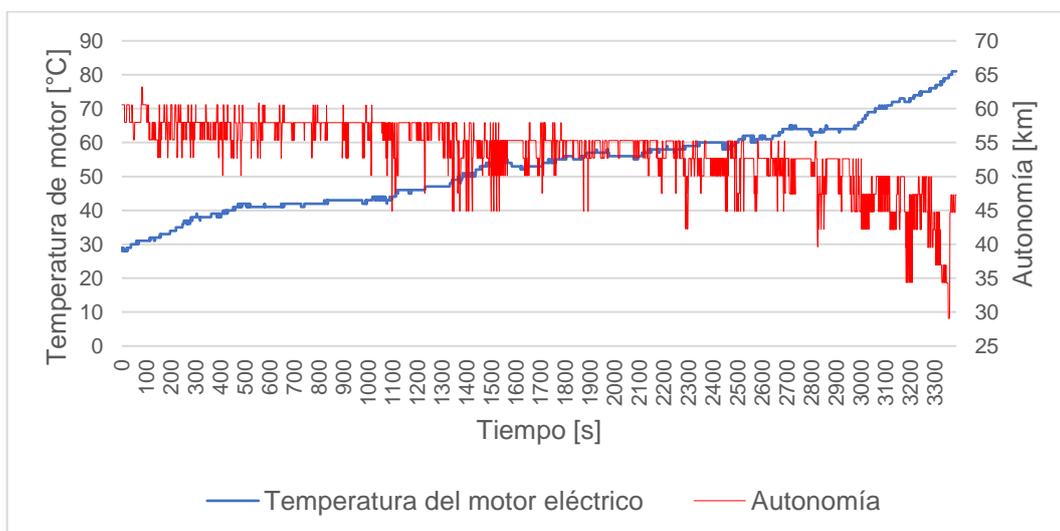


Figura AII.9 Temperatura de motor vs. Autonomía en ruta urbana

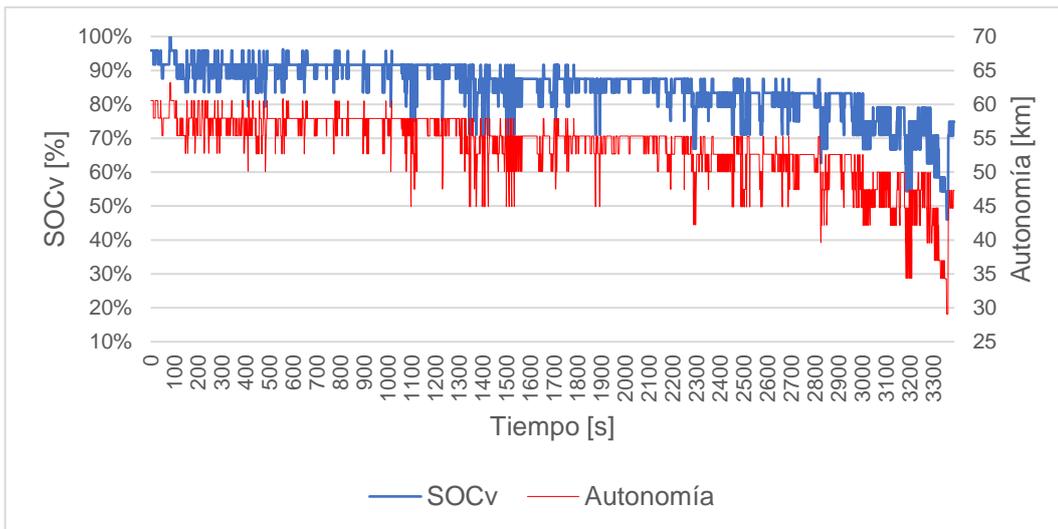


Figura AII.10 SOCv vs. Autonomía en ruta urbana

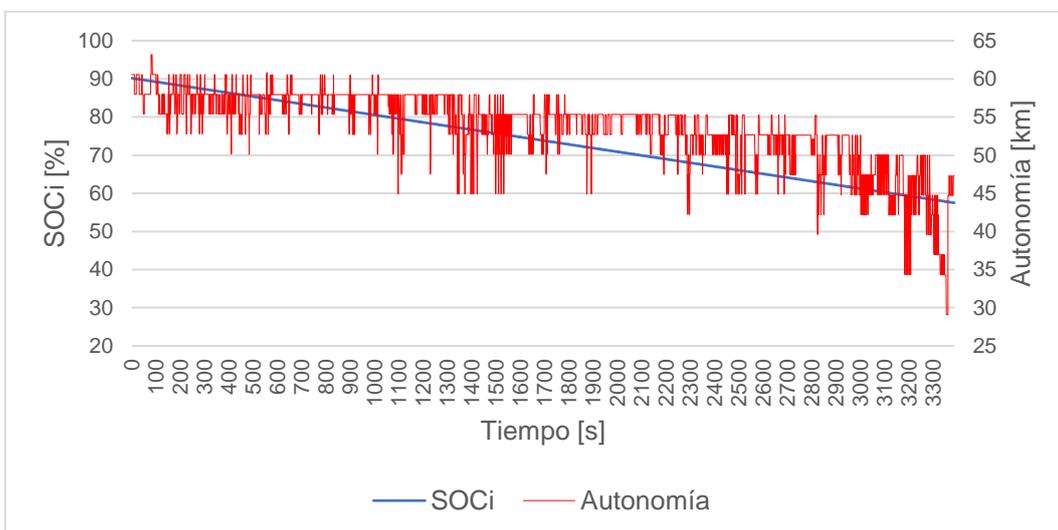


Figura AII.11 SOCi vs. Autonomía en ruta urbana

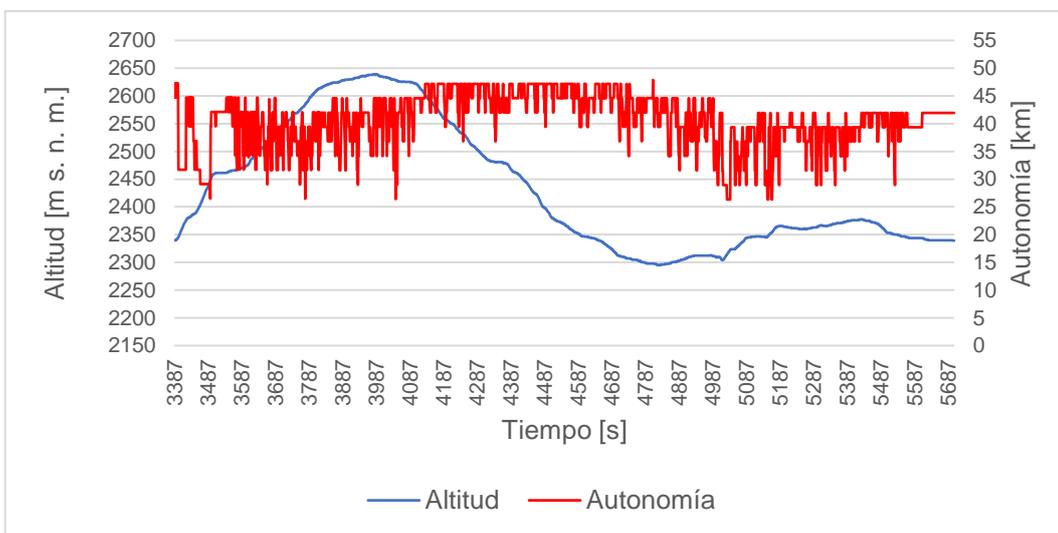


Figura AII.12 Altitud vs. Autonomía en ruta rural

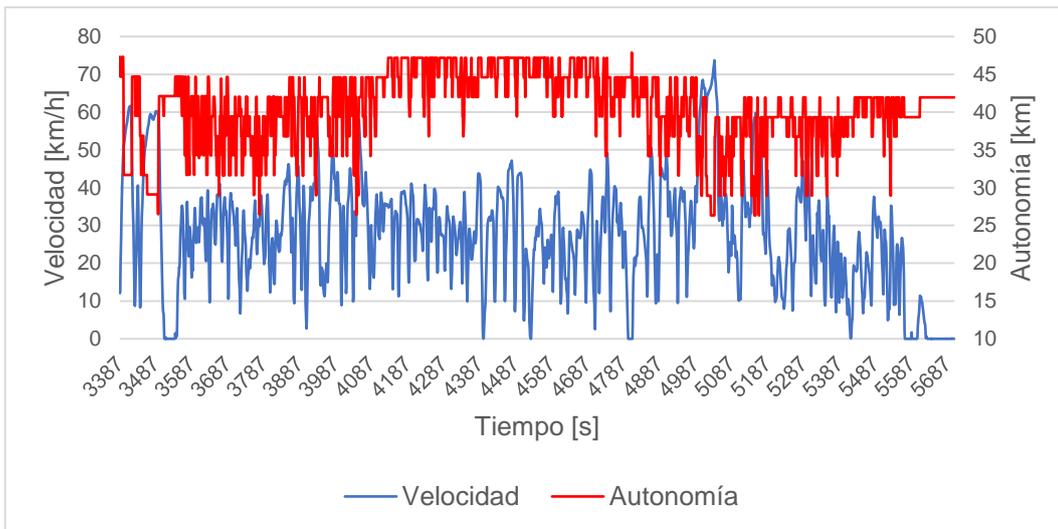


Figura AII.13 Velocidad vs. Autonomía en ruta rural

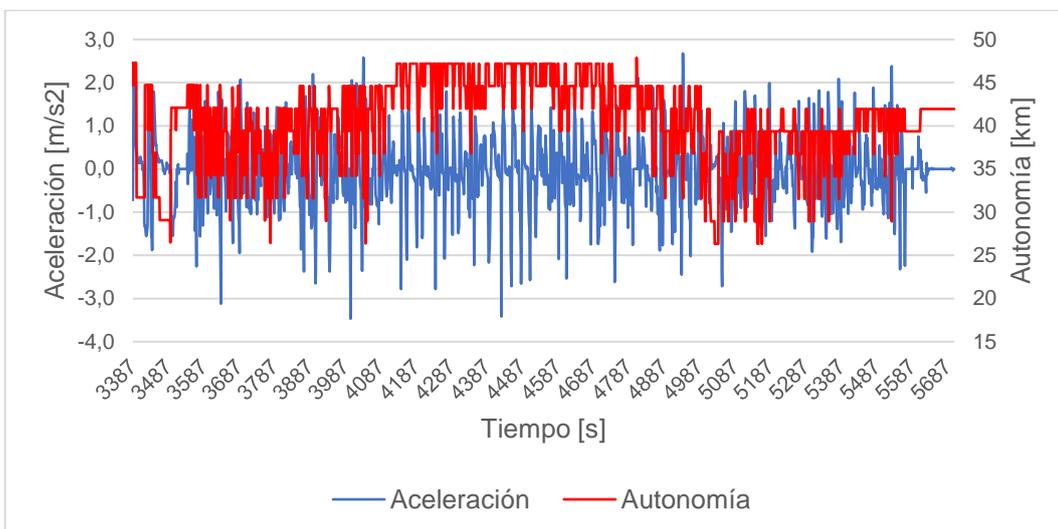


Figura AII.14 Aceleración vs. Autonomía en ruta rural

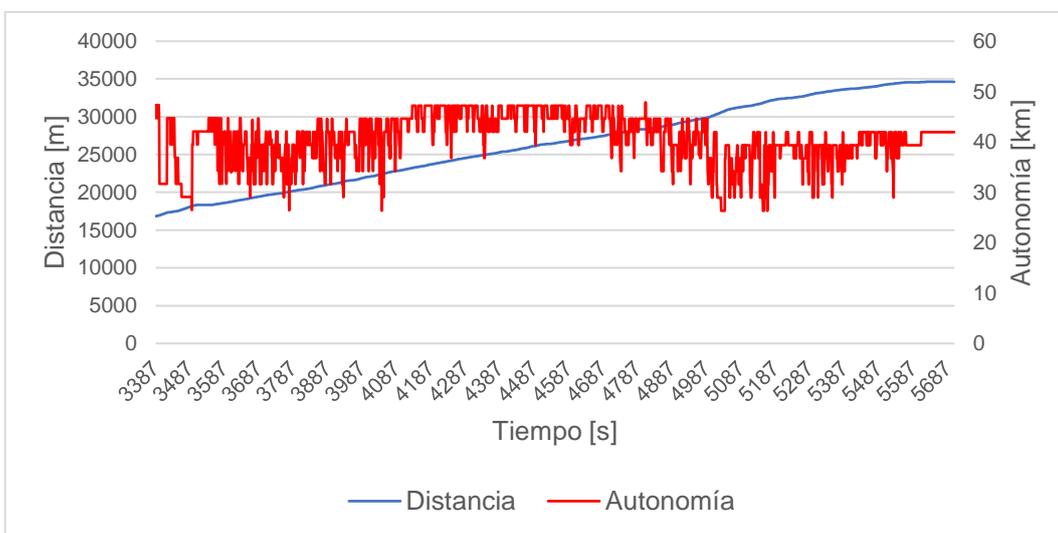


Figura AII.15 Distancia vs. Autonomía en ruta rural

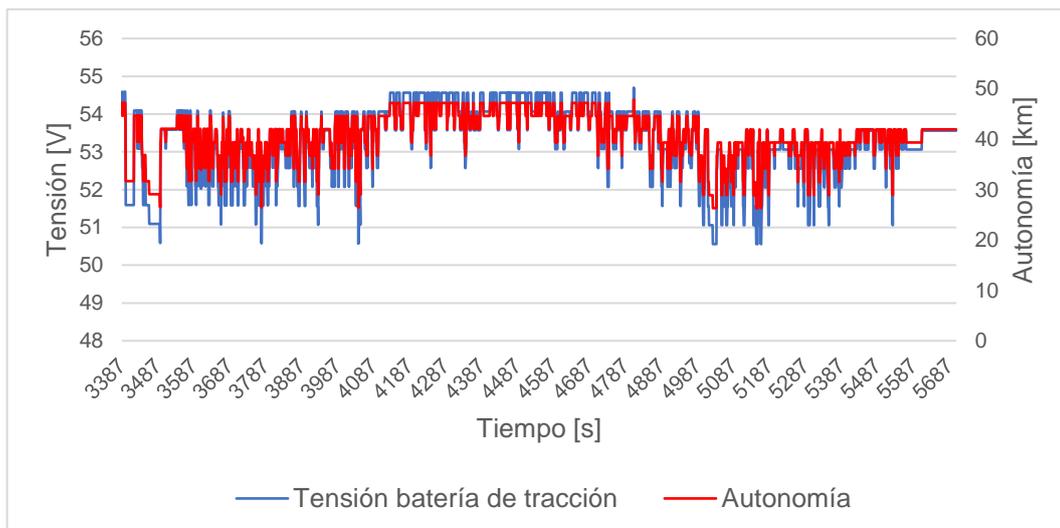


Figura AII.16 Tensión batería de tracción vs. Autonomía en ruta rural

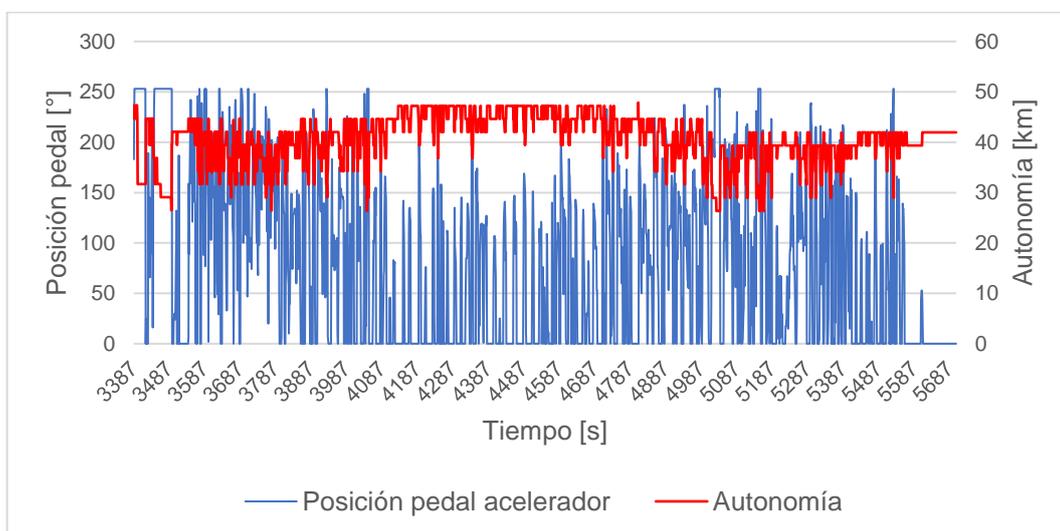


Figura AII.17 Posición pedal del acelerador vs. Autonomía en ruta rural

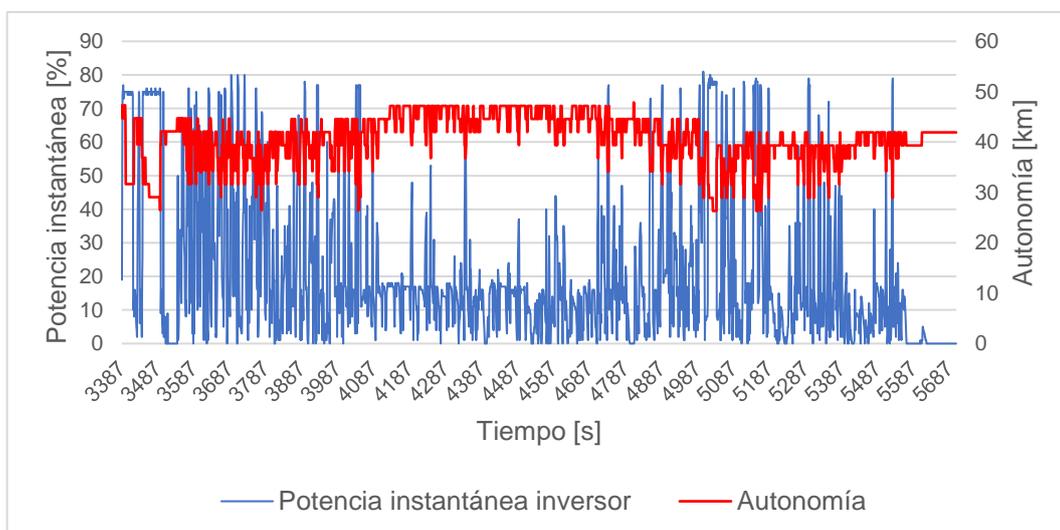
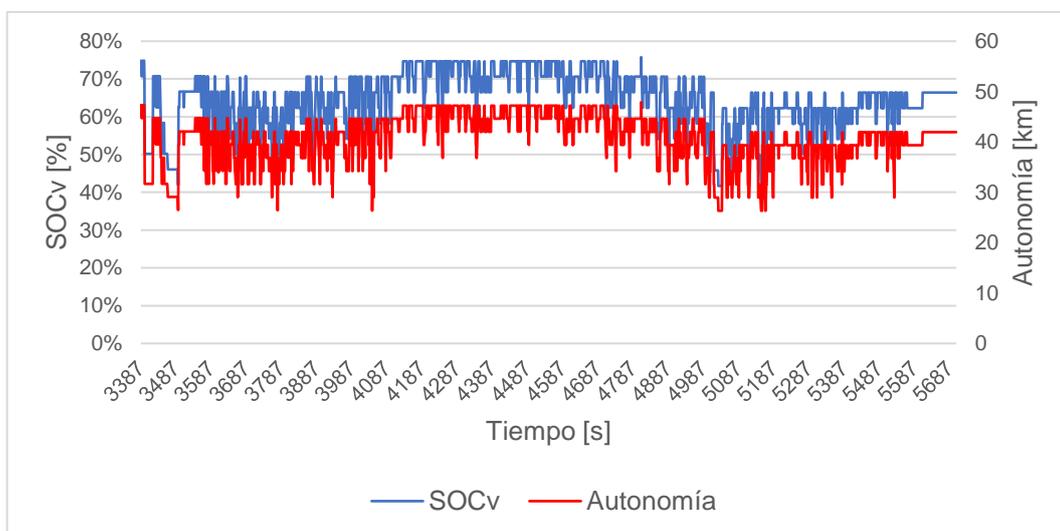
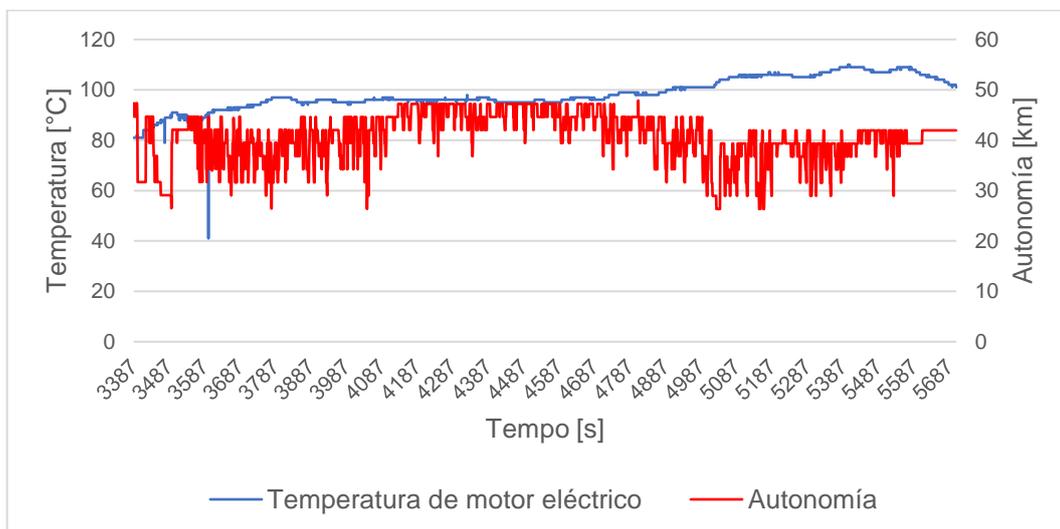
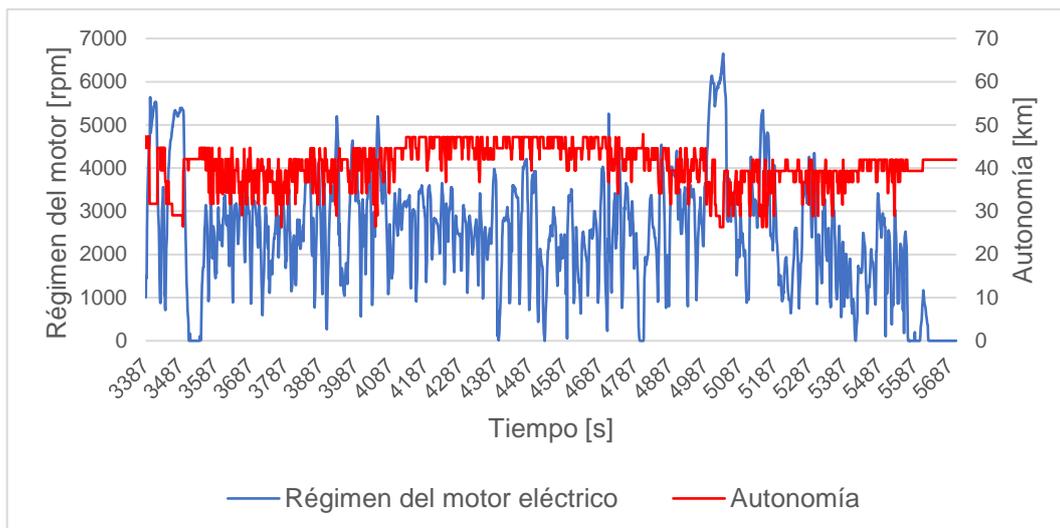


Figura AII.18 Potencia instantánea del inversor vs. Autonomía en ruta rural



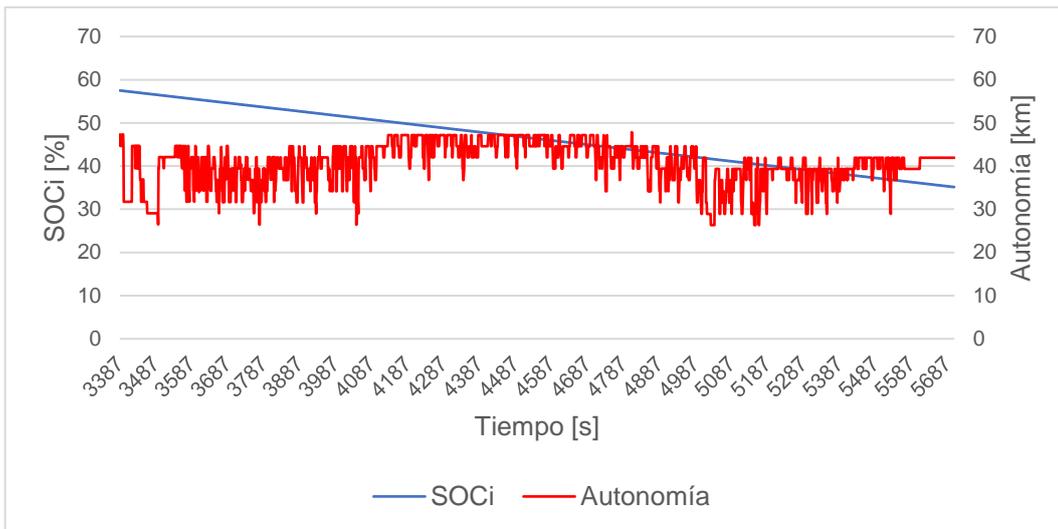


Figura AII.22 SOCi vs. Autonomía en ruta rural

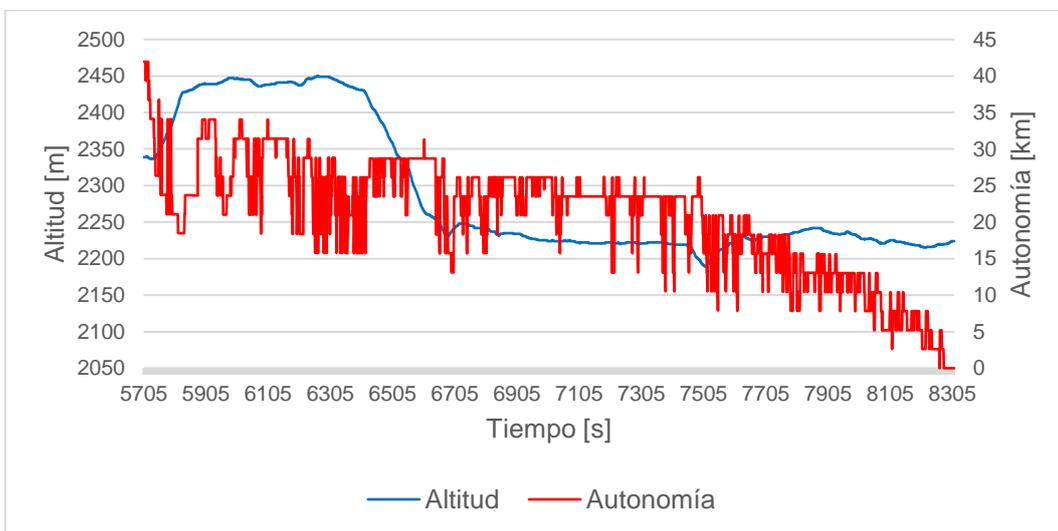


Figura AII.23 Altitud vs. Autonomía en ruta de autopista y final

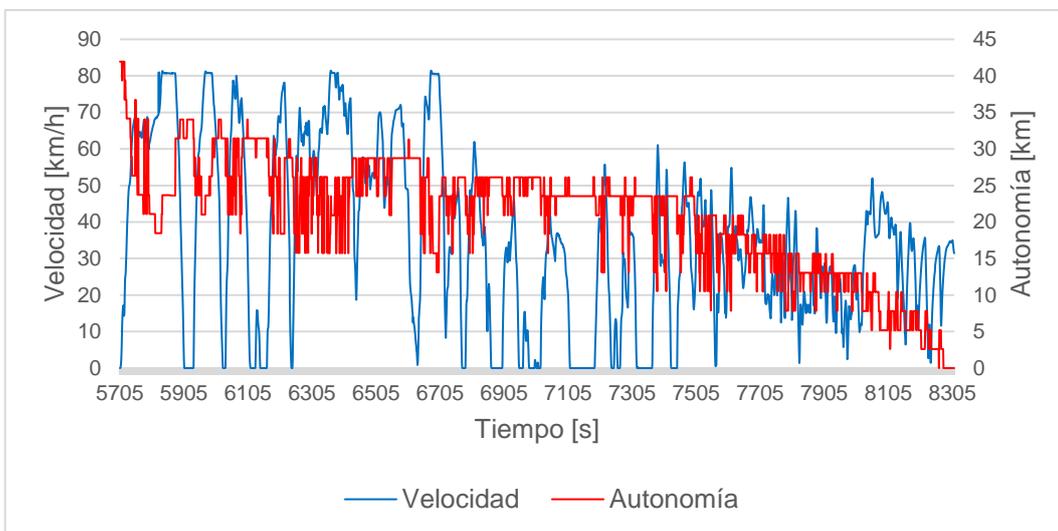


Figura AII.24 Velocidad vs. Autonomía en ruta de autopista y final

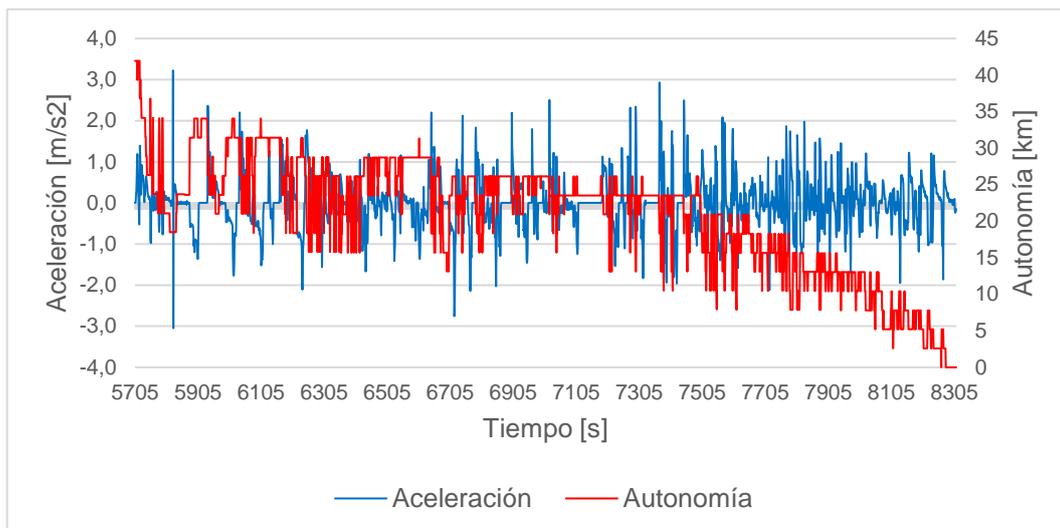


Figura AII.25 Aceleración vs. Autonomía en ruta de autopista y final

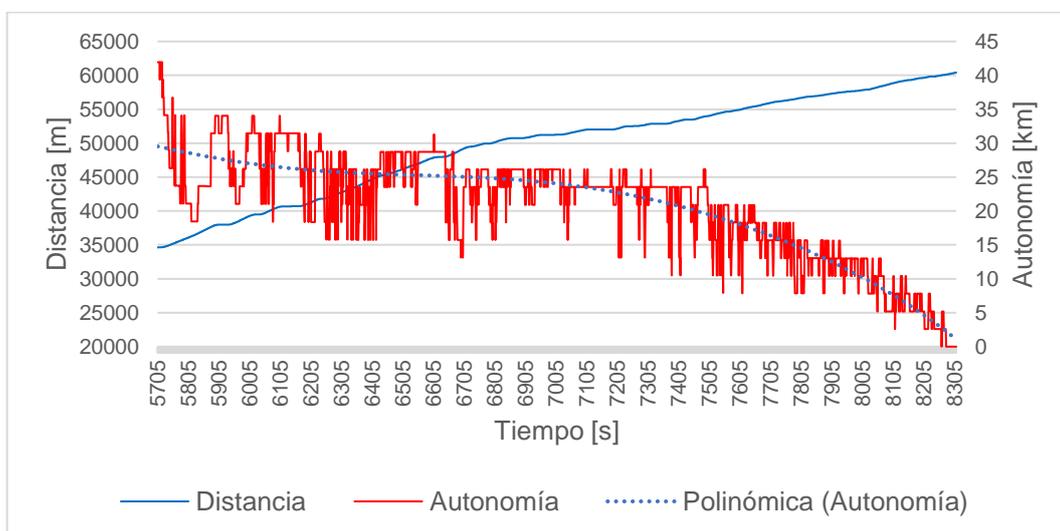


Figura AII.26 Distancia vs. Autonomía en ruta de autopista y final

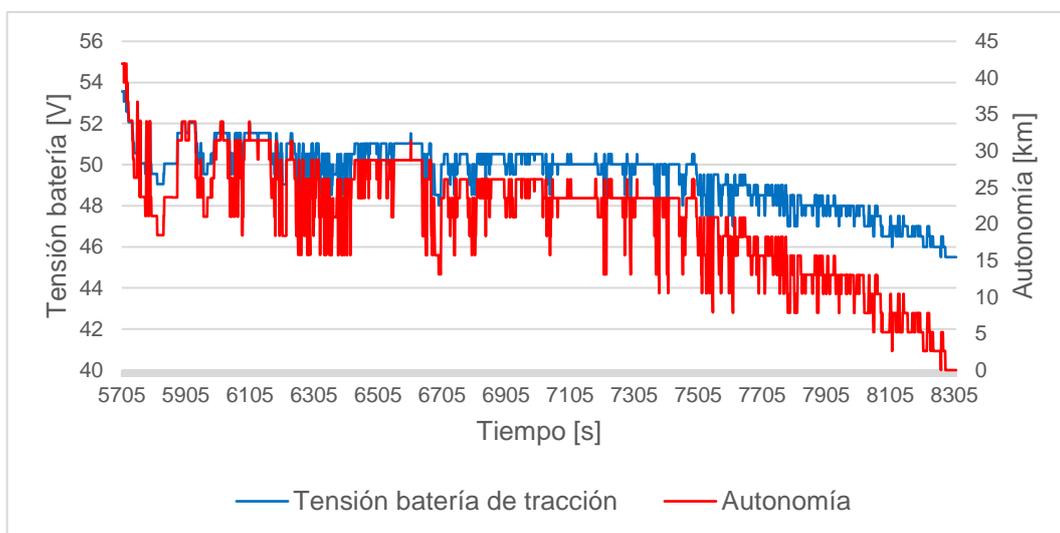


Figura AII.27 Tensión batería de tracción vs. Autonomía en ruta de autopista y final

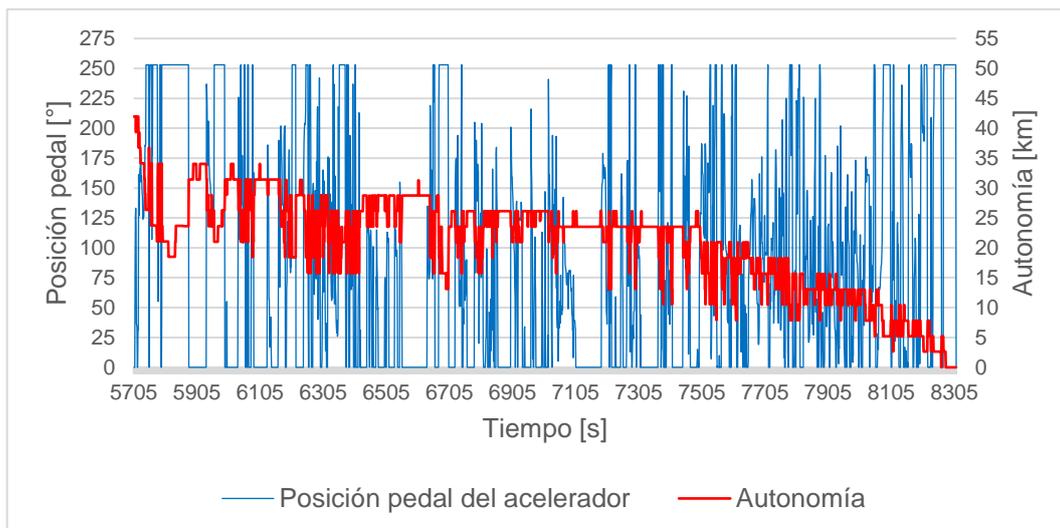


Figura AII.28 Posición pedal del acelerador vs. Autonomía en ruta de autopista y final

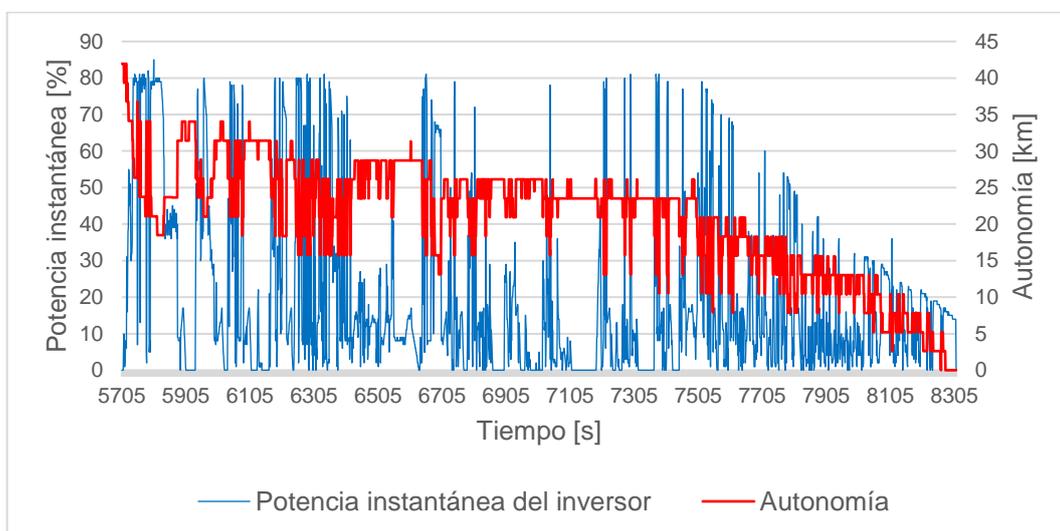


Figura AII.29 Potencia instantánea del inversor vs. Autonomía en ruta de autopista y final

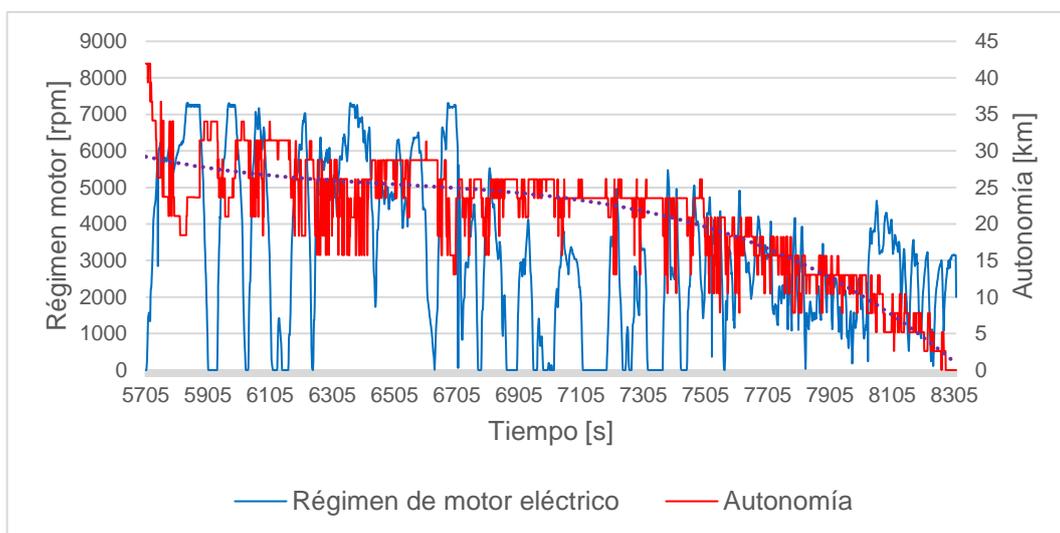


Figura AII.30 Régimen del motor eléctrico vs. Autonomía en ruta de autopista y final

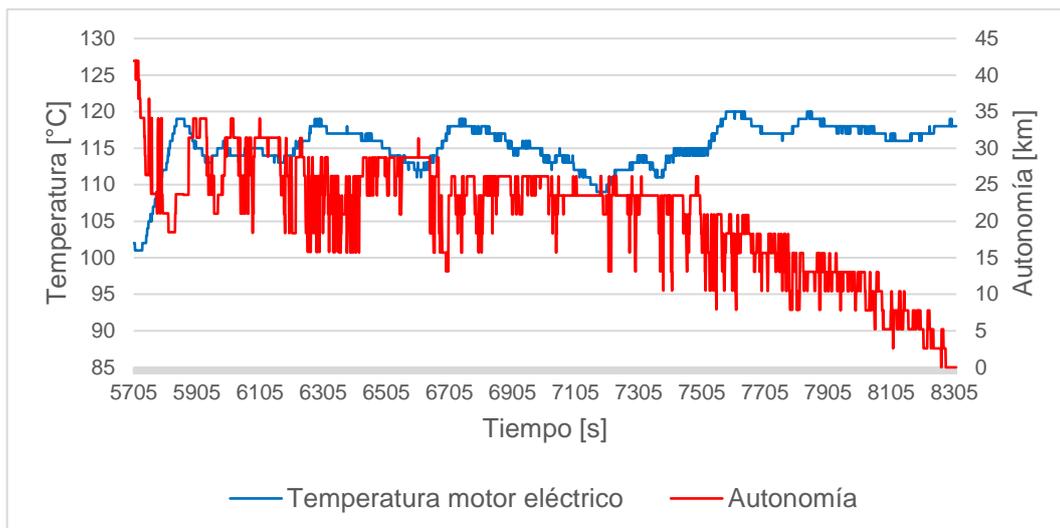


Figura AII.31 Temperatura de motor eléctrico vs. Autonomía en ruta de autopista y final

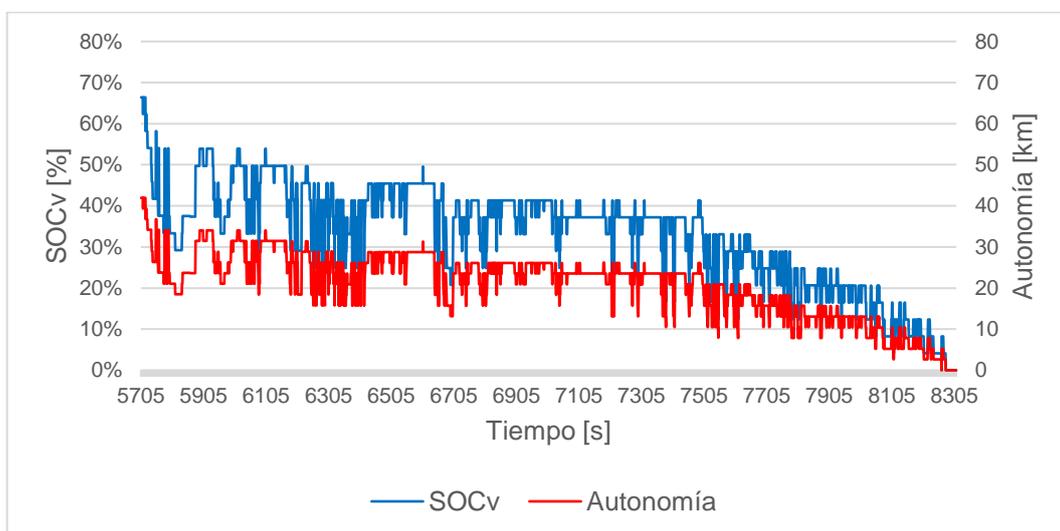


Figura AII.32 SOCv vs. Autonomía en ruta de autopista y final

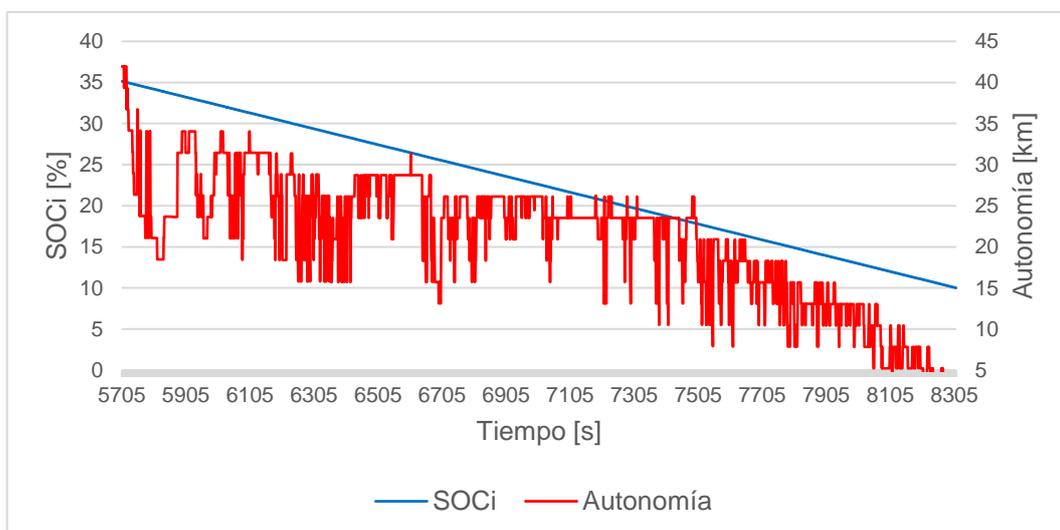


Figura AII.33 SOCi vs. Autonomía en ruta de autopista y final