



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Eléctrica

**Desarrollo de una metodología para la ubicación de estaciones de carga de
vehículos eléctricos, caso de estudio: ruta Cuenca – Guayaquil**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
Ingeniero Eléctrico**

Autores

Jorge Andrés Paute Torres

CI: 1105864712

jorge.paute@outlook.com

María Emilia Sempértegui Moscoso

CI: 0104110317

emisemp96@gmail.com

Director

Ing. Luis Gerardo Gonzalez Morales, PhD.

CI: 1729711059

Co-director

Ing. Juan Leonardo Espinoza Abad, PhD.

CI: 0102559325

Cuenca – Ecuador

12 de octubre de 2020



RESUMEN

La presente tesis desarrolla una metodología para identificar la ubicación de estaciones de carga rápida para vehículos eléctricos en rutas interprovinciales y/o intercantonales, empleando un modelo matemático de consumo energético de un vehículo eléctrico y con base en varios criterios de selección que deben cumplirse en cada una de las potenciales ubicaciones para su selección final.

El capítulo 2 investiga el marco teórico acerca de los vehículos eléctricos, los tipos de tecnologías de baterías, modos de carga y tipos de conectores, entre otros temas.

Posteriormente, el capítulo 3 desarrolla el estudio de un modelo matemático “cuasi-estacionario hacia atrás” para estimar el consumo energético de un vehículo eléctrico, con base en el comportamiento dinámico que el vehículo describe al moverse por la superficie de una carretera.

El capítulo 4 muestra el procedimiento empleado para la adquisición de datos del vehículo mediante equipos de geolocalización y la computadora a bordo del vehículo. Además, se realiza la implementación y calibración del modelo matemático en Matlab, así como la validación del mismo mediante tres rutas de prueba.

El capítulo 5 presenta el proceso metodológico desarrollado para obtener la ubicación de la estación de carga rápida en la ruta Cuenca – Guayaquil, por la vía Colectora Cuenca – Puerto Inca (E582), mediante el uso del modelo matemático propuesto en el capítulo 4.

El capítulo 6 desarrolla la caracterización del comportamiento de la estación de carga rápida PNE Solution de 50 kW y estudia el impacto de ésta en la calidad de la energía eléctrica, tomando como referencia la Regulación No. ARCONEL 005/18.

Finalmente, el capítulo 7 presenta las conclusiones generales del trabajo, recomendaciones y trabajos futuros.

Palabras claves: Vehículo eléctrico. Electromovilidad. Modos de carga. Estación de carga rápida. Estado de carga. Autonomía. Modelo matemático. Matlab. Distorsión armónica.



ABSTRACT

In this work, the authors present a methodology to identify the location of fast charging stations for electric vehicles at interprovincial and/or intercantonal routes, using a mathematical model of a vehicle's energy consumption and based on various criteria that each potential location must comply for its final selection.

In chapter 2, there is a review about electric vehicles, types of battery technologies, charging modes and types of connectors, among other topics.

Subsequently, chapter 3 develops the study of a "quasi-stationary backward" mathematical model to estimate the energy consumption of an electric vehicle based on the dynamic behavior of a moving car on a road's surface.

Chapter 4 shows the procedure used for data acquisition with a vehicle using geolocation equipment and the vehicle's on-board computer. In addition, a mathematical model implementation and its calibration are carried on Matlab, as well as the validation through three test routes.

Chapter 5 presents the methodological process developed to obtain the location of the fast charging station on the Cuenca - Guayaquil route via Colectora Cuenca – Puerto Inca (E582), using the proposed mathematical model on chapter 4.

Chapter 6 explains the behavior of the PNE Solution 50 kW fast charging station and its impact on the quality of electrical energy, taking as reference Regulation No. ARCONEL 005/18.

Finally, chapter 7 presents the conclusions, recommendations and future work.

Keywords: Electric vehicle. Electromobility. Charging modes. Fast charging stations. State of charge. Autonomy. Mathematical model. Matlab. Harmonic distortion.



Índice

| | |
|---|-----------|
| Índice de figuras | 9 |
| Abreviaturas | 22 |
| Capítulo 1. Planteamiento de la tesis | 24 |
| 1.1. Antecedentes | 24 |
| 1.2. Justificación | 26 |
| 1.3. Objetivos | 27 |
| 1.3.1. Objetivo general | 27 |
| 1.3.2. Objetivos específicos | 27 |
| 1.4. Alcance | 28 |
| Capítulo 2. Marco teórico | 30 |
| 2.1. Introducción | 30 |
| 2.2. Evolución del vehículo eléctrico | 30 |
| 2.3. Clasificación de la tecnología vehicular | 34 |
| 2.3.1. Vehículo de combustión interna | 35 |
| 2.3.2. Vehículo eléctrico de batería (BEV) | 35 |
| 2.3.3. Vehículo eléctrico híbrido (HEV) | 36 |
| 2.3.3.1. Vehículo eléctrico híbrido – serie | 38 |
| 2.3.3.2. Vehículo eléctrico híbrido – paralelo | 39 |
| 2.3.3.3. Vehículo eléctrico híbrido – serie/paralelo | 39 |
| 2.3.4. Vehículo eléctrico híbrido enchufable (PHEV) | 40 |
| 2.3.5. Vehículo eléctrico de pila de combustible (FCEV) | 41 |
| 2.4. Autonomía de los vehículos eléctricos | 41 |
| 2.5. Tipos de recarga de un vehículo eléctrico | 42 |
| 2.5.1. Recarga lenta – Nivel 1 | 42 |
| 2.5.2. Recarga semi-rápida – Nivel 2 | 43 |
| 2.5.3. Recarga rápida – Nivel 3 | 44 |
| 2.6. Tipos de conectores | 46 |
| 2.6.1. Schuko | 46 |
| 2.6.2. Tipo 1 / Yazaki - SAE J1772, IEC 62196-1 | 46 |
| 2.6.3. Tipo 2 / Mennekes - IEC 62196-2 | 47 |
| 2.6.4. Tipo 3 / Scame | 47 |
| 2.6.5. Sistema de carga combinada CCS | 48 |
| 2.6.5.1. CCS Combo 1 | 49 |
| 2.6.5.2. CCS Combo 2 | 49 |
| 2.6.6. Tipo 4 / CHAdeMO | 50 |
| 2.6.7. Tesla Supercharger | 51 |



| | | |
|---|---|-----------|
| 2.6.8. | GB/T 20234 | 51 |
| 2.7. | Modos de carga | 53 |
| 2.7.1. | Modo 1 | 53 |
| 2.7.2. | Modo 2 | 53 |
| 2.7.3. | Modo 3 | 54 |
| 2.7.4. | Modo 4 | 54 |
| 2.8. | Definición e importancia de las estaciones de carga | 55 |
| 2.9. | Ventajas y desventajas del uso de vehículos eléctricos frente a los autos de combustión interna | 56 |
| 2.10. | Situación internacional sobre los vehículos eléctricos | 57 |
| 2.11. | Situación y normativa nacional sobre los vehículos eléctricos | 57 |
| Capítulo 3. Estudio del modelo matemático del consumo energético de un vehículo eléctrico | | 60 |
| 3.1. | Introducción | 60 |
| 3.2. | Dinámica del vehículo | 61 |
| 3.3. | Modelos de consumo energético | 62 |
| 3.4. | Desarrollo del modelo matemático | 64 |
| 3.4.1. | Fuerza de resistencia a la rodadura | 66 |
| 3.4.1.1. | Factores que afectan al coeficiente de resistencia a la rodadura | 67 |
| 3.4.2. | Fuerza de arrastre aerodinámico | 70 |
| 3.4.3. | Fuerza de la pendiente | 72 |
| 3.4.4. | Fuerza de aceleración lineal | 73 |
| 3.4.5. | Fuerza de aceleración angular | 73 |
| 3.4.6. | Potencia | 74 |
| 3.4.7. | Energía | 77 |
| Capítulo 4. Metodología para la adquisición de datos del vehículo eléctrico e implementación del modelo matemático | | 79 |
| 4.1. | Introducción | 79 |
| 4.2. | Equipos utilizados | 80 |
| 4.2.1. | Kia Soul EV modelo 2016 | 80 |
| 4.2.2. | OBD2 (On Board Diagnostics) | 82 |
| 4.2.3. | Software Torque pro | 84 |
| 4.2.4. | Teléfono inteligente Huawei Mate 20 Lite | 85 |
| 4.2.5. | Navegador GPS Garmin Monterra | 85 |
| 4.3. | Procedimiento de adquisición de datos | 86 |
| 4.3.1. | Obtención de datos | 89 |
| 4.3.2. | Factores que influyen en la adquisición de datos | 91 |



| | |
|--|------------|
| 4.3.2.1. Equipos / Dispositivos | 92 |
| 4.4. Implementación del modelo matemático | 93 |
| 4.4.1. Cálculo de distancia entre dos puntos geográficos | 96 |
| 4.4.2. Cálculo de ángulo de pendiente | 97 |
| 4.4.3. Cálculo de densidad del aire | 97 |
| 4.4.4. Cálculo de fuerzas | 98 |
| 4.4.4.1. Fuerza de resistencia a la rodadura | 99 |
| 4.4.4.2. Fuerza de arrastre aerodinámico | 100 |
| 4.4.4.3. Fuerza de la pendiente..... | 101 |
| 4.4.4.4. Fuerza de aceleración lineal..... | 101 |
| 4.4.4.5. Fuerza de tracción | 101 |
| 4.4.5. Cálculo de potencia de tracción | 101 |
| 4.4.6. Eficiencias | 102 |
| 4.4.7. Cálculo de flujos de potencia de la batería | 102 |
| 4.4.8. Cálculo de flujos de energía | 103 |
| 4.4.9. Cálculo de flujo neto de energía de la batería..... | 103 |
| 4.5. Modelo experimental..... | 103 |
| 4.6. Validación del modelo matemático..... | 104 |
| 4.6.1. Ruta 1: Cuenca – Molleturo | 105 |
| 4.6.2. Ruta 2: Cuenca – Molleturo con masa adicional (200 kg) | 108 |
| 4.6.3. Ruta 3: Cuenca – Cañar | 113 |
| 4.6.4. Ruta 4: Cuenca – Cañar ruta con masa adicional (200 kg)..... | 117 |
| 4.6.5. Ruta 5: Cuenca – Léntag..... | 121 |
| 4.7. Conclusiones | 125 |
| Capítulo 5. Metodología para seleccionar la ubicación de estaciones de carga rápida, caso de estudio: ruta Cuenca - Guayaquil | 127 |
| 5.1. Introducción | 127 |
| 5.2. Metodología | 129 |
| 5.3. Desarrollo de la metodología | 133 |
| 5.3.1. Paso 1 – Estudio de las condiciones de funcionamiento del Kia Soul EV, con capacidad de almacenamiento de energía de 27 kWh | 133 |
| 5.3.2. Paso 2 – Identificación de factores que influyen en la ubicación de EVCS..... | 134 |
| 5.3.2.1. Factores geográficos y de carretera | 134 |
| 5.3.2.2. Factores ambientales | 135 |
| 5.3.2.3. Factores eléctricos | 135 |
| 5.3.2.4. Factores sociales | 136 |
| 5.3.2.5. Factores económicos | 137 |
| 5.3.2.6. Factor de simulación | 138 |
| 5.3.3. Paso 3 – Rango de evaluación de factores..... | 138 |
| 5.3.4. Paso 4 – Caracterización de la ruta de estudio..... | 141 |



| | | |
|---|---|------------|
| 5.3.5. | Paso 5 – Panorama del mercado de VE en Ecuador | 149 |
| 5.3.6. | Paso 6 – Definición del tipo de EVCS y requisitos para la selección de una EVCS | 150 |
| 5.3.7. | Paso 7 – Selección de la EVCS..... | 152 |
| 5.3.8. | Paso 8 – Selección y análisis de los sitios para la ubicación de EVCS mediante el modelo matemático..... | 155 |
| 5.3.8.1. | Análisis de la ruta de estudio..... | 155 |
| 5.3.8.2. | Escenario base | 157 |
| 5.3.8.3. | Escenario 1 | 168 |
| 5.3.8.4. | Escenario 2..... | 169 |
| 5.3.8.5. | Escenario 3..... | 170 |
| 5.3.8.6. | Escenario 4..... | 172 |
| 5.3.8.7. | Escenario 5..... | 173 |
| 5.3.8.8. | Escenario 6..... | 174 |
| 5.3.8.9. | Escenario 7..... | 175 |
| 5.3.8.10. | Escenario 8 | 176 |
| 5.3.8.11. | Escenario 9 | 177 |
| 5.3.8.12. | Escenario 10 | 178 |
| 5.3.8.13. | Escenario 11 | 179 |
| 5.3.9. | Paso 9 – Análisis de resultados | 180 |
| 5.3.10. | Paso 11 – Mapa de la ubicación final de las EVCS | 182 |
| 5.4. | Conclusiones | 184 |
| Capítulo 6. Caracterización de estaciones de carga rápida con salida en DC | | 186 |
| 6.1. | Introducción | 186 |
| 6.2. | Armónicos | 187 |
| 6.3. | Distorsión armónica | 188 |
| 6.4. | Criterios y normativas | 192 |
| 6.5. | Procedimiento para el estudio del comportamiento de una estación de carga rápida con salida en DC | 194 |
| 6.6. | Análisis del comportamiento del proceso de carga de la batería del VE mediante el uso de la estación de carga rápida | 197 |
| 6.7. | Análisis de armónicos durante el proceso de carga de la batería del VE mediante el uso de la estación de carga rápida | 201 |
| 6.8. | Conclusiones | 208 |
| Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones | | 211 |
| 7.1. | Conclusiones | 211 |
| 7.2. | Recomendaciones | 213 |



| | |
|--|------------|
| 7.3. Trabajos futuros | 213 |
| Bibliografía | 215 |
| Anexos | 228 |
| Anexo #1: Planilla de viaje | 228 |
| Anexo #2: Muestra del registro de los primeros datos del VE obtenidos a través del programa Torque Pro en una ruta de ensayo | 229 |
| Anexo #3: Resultados de las simulaciones del modelo matemático implementado en cada una de las rutas de prueba de validación | 230 |
| Anexo #4: Costo unitario por km de alimentador primario | 233 |
| Anexo #5: Ficha técnica de la estación ABB Terra 54 CJG | 234 |
| Anexo #6: Simulaciones de la ruta de estudio | 236 |
| Anexo #7: Presupuesto referencial de la instalación de una EVCS | 236 |
| Anexo #8: Ponderación del escenario 1 | 237 |
| Anexo #9: Ponderación del escenario 2 | 240 |
| Anexo #10: Ponderación del escenario 3 | 241 |
| Anexo #11: Ponderación del escenario 4 | 244 |
| Anexo #12: Ponderación del escenario 5 | 246 |
| Anexo #13: Ponderación del escenario 6 | 247 |
| Anexo #14: Ponderación del escenario 7 | 248 |
| Anexo #15: Ponderación del escenario 8 | 249 |
| Anexo #16: Ponderación del escenario 9 | 250 |
| Anexo #17: Ponderación del escenario 10 | 251 |
| Anexo #18: Ponderación del escenario 11 | 252 |
| Anexo #19. Simulaciones realizadas con una masa de 69 kg | 253 |
| Anexo #20: Ficha técnica de la estación PNE Solution 50 kW | 255 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1: Experimentos que contribuyen en la evolución del vehículo eléctrico..... | 31 |
| Figura 2.2: Evolución del vehículo eléctrico. | 32 |
| Figura 2.3: Ford Modelo T [16]..... | 33 |
| Figura 2.4: Vehículos eléctricos que marcaron y marcan tendencia en la actualidad. | 34 |
| Figura 2.5: Estructura del vehículo con motor de combustión interna [23]..... | 35 |
| Figura 2.6: Estructura del vehículo eléctrico de batería [23]. | 36 |
| Figura 2.7: Dirección de los flujos de energía en vehículos eléctricos híbridos [23]..... | 37 |
| Figura 2.8: Estructura del vehículo eléctrico híbrido - serie [23]. | 38 |
| Figura 2.9: Estructura del vehículo eléctrico híbrido - paralelo [23]. | 39 |
| Figura 2.10: Estructura del vehículo eléctrico híbrido – serie/paralelo [23]. | 40 |
| Figura 2.11: Estructura del vehículo eléctrico híbrido complejo [23]. | 40 |
| Figura 2.12: Estructura del vehículo eléctrico híbrido enchufable [23]. | 41 |
| Figura 2.13: Vehículo eléctrico de pila de combustible [23]. | 41 |
| Figura 2.14: Cable portátil para la recarga del VE en Nivel 1. | 43 |
| Figura 2.15: Equipo de suministro eléctrico para el Nivel 2. | 44 |
| Figura 2.16: Equipo de suministro eléctrico para el Nivel 3. | 45 |
| Figura 2.17: Conector Schuko..... | 46 |
| Figura 2.18: Conector SAE J1772..... | 47 |
| Figura 2.19: Conector Mennekes. | 47 |
| Figura 2.20: Conector Scame [35]..... | 48 |
| Figura 2.21: Conector Combo 1. | 49 |
| Figura 2.22: Conector Combo 2. | 50 |
| Figura 2.23: Conector CHAdeMO. | 50 |
| Figura 2.24: Conector Tesla Supercharger en Europa y resto del mundo (izquierda) y Norteamérica (derecha) [37]..... | 51 |
| Figura 2.25: Conector GB/T 20234-2. | 52 |
| Figura 2.26: Conector GB/T 20234-3. | 52 |
| Figura 2.27: Modos de carga [46]..... | 55 |
| Figura 2.28: Modos de conexión entre el VE y la red de suministro [47]. | 55 |
| Figura 3.1: Diagrama de vectores que intervienen en el plano inclinado del VE [60]..... | 64 |
| Figura 3.2: Diagrama de fuerzas que actúan sobre un vehículo [59]..... | 65 |
| Figura 3.3: Desviación del neumático y resistencia a la rodadura [11]. | 66 |
| Figura 3.4: Efecto de histéresis en la carga y descarga de un neumático [62]. | 68 |
| Figura 3.5: Efectos de la presión en el neumático sobre la adherencia [64]. ... | 69 |
| Figura 3.6: Ondas producidas en un neumático a alta velocidad [62]. | 69 |
| Figura 3.7: Arrastre de presión [11]. | 71 |
| Figura 3.8: Flujos de potencia en un VE [59]. | 76 |
| Figura 4.1: Kia Soul EV. | 80 |



| | |
|--|-----|
| Figura 4.2: Proceso de obtención de datos del vehículo [85]. | 83 |
| Figura 4.3: Dispositivo ELM327 [87]. | 84 |
| Figura 4.4: Aplicación Torque Pro. | 85 |
| Figura 4.5: Teléfono Huawei Mate 20 Lite [89]. | 85 |
| Figura 4.6: GPS Garmin Monterra [92]. | 86 |
| Figura 4.7: Representación de la adquisición de datos por parte del teléfono y GPS en una ruta. | 87 |
| Figura 4.8: Diagrama de flujo para la obtención de datos del vehículo. | 90 |
| Figura 4.9: Diagrama de flujo para la obtención del consumo de energía del VE. | 95 |
| Figura 4.10: Cálculo de ángulo de pendiente [110]. | 97 |
| Figura 4.11: Coeficiente de resistencia a la rodadura del modelo de Stuttgart. | 99 |
| Figura 4.12: Presión de inflado del neumático del Kia Soul EV. | 100 |
| Figura 4.13: Mapa de la ruta 1: Cuenca - entrada a la parroquia Molleturo. | 105 |
| Figura 4.14: Perfil de elevación de la ruta 1: Cuenca - entrada a la parroquia Molleturo. | 106 |
| Figura 4.15: (a) Energía de carga (b) Energía de descarga y (c) Energía neta de la ruta 1 de ida. | 107 |
| Figura 4.16: (a) Energía de carga (b) Energía de descarga y (c) Energía neta de la ruta 1 de regreso. | 108 |
| Figura 4.17: Mapa de la ruta 2: Cuenca - 9.8 km antes de la entrada a la parroquia Molleturo. | 109 |
| Figura 4.18: VE con carga adicional de 200 kg. | 109 |
| Figura 4.19: Perfil de elevación de la ruta 2: Cuenca - 9.8 km antes de la entrada a la parroquia Molleturo. | 110 |
| Figura 4.20: (a) Energía de carga (b) Energía de descarga y (c) Energía neta de la ruta 2 de ida. | 111 |
| Figura 4.21: (a) Energía de carga (b) Energía de descarga y (c) Energía neta de la ruta 2 de regreso. | 112 |
| Figura 4.22: Mapa de la ruta 3: Cuenca - 14.2 km antes de la ciudad de Cañar. | 114 |
| Figura 4.23: Perfil de elevación de la ruta 3: Cuenca - 14.2 km antes de la ciudad de Cañar. | 114 |
| Figura 4.24: (a) Energía de carga (b) Energía de descarga y (c) Energía neta de la ruta 3 de ida. | 115 |
| Figura 4.25: (a) Energía de carga (b) Energía de descarga y (c) Energía neta de la ruta 3 de regreso. | 116 |
| Figura 4.26: Mapa de la ruta 4: Cuenca - estación de servicio PetroEcuador Cumbre Andina. | 117 |
| Figura 4.27: Perfil de elevación de la ruta 4: Cuenca - estación de servicio PetroEcuador Cumbre Andina. | 118 |
| Figura 4.28: (a) Energía de carga (b) Energía de descarga y (c) Energía neta de la ruta 4 de ida. | 119 |
| Figura 4.29: (a) Energía de carga (b) Energía de descarga y (c) Energía neta de la ruta 4 de regreso. | 120 |



| | |
|--|-----|
| Figura 4.30: Mapa de la ruta 5: Cuenca - entrada de la comunidad de Léntag. | 122 |
| Figura 4.31: Perfil de elevación de la ruta 5: Cuenca - entrada de la comunidad de Léntag. | 122 |
| Figura 4.32: (a) Energía de carga (b) Energía de descarga y (c) Energía neta de la ruta 5 de ida. | 123 |
| Figura 4.33: (a) Energía de carga (b) Energía de descarga y (c) Energía neta de la ruta 5 de regreso. | 124 |
| Figura 5.1: Diagrama de flujo para la ubicación de la EVCS. | 132 |
| Figura 5.2: Distribución del terreno para la recarga del VE [130]. | 135 |
| Figura 5.3: Organización territorial de la provincia del Azuay y Guayas [134]. | 142 |
| Figura 5.4: Vista satelital con relieve topográfico y elevación de la ruta Cuenca – Guayaquil vía E582. | 143 |
| Figura 5.5: Áreas protegidas en la ruta Cuenca - Guayaquil por la vía Colectora Cuenca – Puerto Inca (E582)[146]. | 144 |
| Figura 5.6: Áreas de prestación del servicio público de energía eléctrica en el Ecuador [148]. | 145 |
| Figura 5.7: Mapa de alimentadores en la ruta de estudio. | 148 |
| Figura 5.8: Ventas mensuales de VE [4]. | 149 |
| Figura 5.9: Clasificación de las EVCS [129]. | 150 |
| Figura 5.10: Estación de carga rápida ABB Terra 54 CJG [153]. | 153 |
| Figura 5.11: Esquema del punto de entrega de energía eléctrica en medio voltaje a la EVCS. | 154 |
| Figura 5.12: Perfil de elevación de la ruta Cuenca - Guayaquil. | 156 |
| Figura 5.13: Energía neta consumida en la ruta de estudio, tanto para la ida como al regreso, cuando el VE está cargado con una masa de 69 kg. | 156 |
| Figura 5.14: Energía neta consumida en la ruta de estudio, tanto para la ida como al regreso, cuando el VE está cargado con una masa de 345 kg. | 156 |
| Figura 5.15: Escenario base- SoC del VE durante la ruta de regreso. | 159 |
| Figura 5.16: Escenario base- SoC del VE durante la ruta de regreso. | 160 |
| Figura 5.17: Escenario base- ubicación de EVCS. | 160 |
| Figura 5.18: Mapa y vista 3D del lugar de ubicación de la EVCS Virgen del Cajas. | 161 |
| Figura 5.19: Vista satelital y 3D del lugar de ubicación de la EVCS Hierba Buena. | 164 |
| Figura 5.20: Vista satelital y 3D del lugar de ubicación de la EVCS Cerritos. | 165 |
| Figura 5.21: Escenario 1 - ubicaciones de las EVCS. | 168 |
| Figura 5.22: Escenario 2 - ubicaciones de las EVCS. | 170 |
| Figura 5.23: Escenario 3 - ubicaciones de las EVCS. | 171 |
| Figura 5.24: Escenario 4 - ubicaciones de las EVCS. | 172 |
| Figura 5.25: Escenario 5 - ubicaciones de las EVCS. | 173 |
| Figura 5.26: Escenario 6 - ubicaciones de las EVCS. | 174 |
| Figura 5.27: Escenario 7 - ubicaciones de las EVCS. | 175 |



| | |
|--|-----|
| Figura 5.28: Escenario 8 - ubicaciones de las EVCS. | 176 |
| Figura 5.29: Escenario 9 - ubicaciones de las EVCS. | 177 |
| Figura 5.30: Escenario 10 - ubicaciones de las EVCS. | 178 |
| Figura 5.31: Escenario 11 - ubicaciones de las EVCS. | 179 |
| Figura 5.32: Ubicación final de EVCS para una infraestructura de carga robusta. | 183 |
| Figura 5.33: Ubicación final de EVCS para una infraestructura de carga media. | 183 |
| Figura 5.34: Ubicación final de EVCS para una infraestructura de carga mínima..... | 183 |
| Figura 6.1: Teorema de Fourier para señales senoidales periódicas y continuas. | 188 |
| Figura 6.2: Análisis espectral. | 189 |
| Figura 6.3: Punto común de acoplamiento en el lado de baja tensión del transformador [171]. | 194 |
| Figura 6.4: Punto común de acoplamiento en el lado de alta tensión del transformador [171]. | 194 |
| Figura 6.5: PowerPad® III Modelo 8333 [172]..... | 195 |
| Figura 6.6: Estación de carga rápida de 50 kW de PNE Solution. | 195 |
| Figura 6.7: Transformador trifásico INATRA 100 kVA. | 196 |
| Figura 6.8: Esquema de medición. | 196 |
| Figura 6.9: Conexión del analizador de energía al transformador. | 196 |
| Figura 6.10: Carga del VE. | 197 |
| Figura 6.11: Comportamiento del proceso de carga de un VE mediante la estación de carga rápida (I, V, P, E). | 198 |
| Figura 6.12: Factor de potencia durante los primeros 24 segundos de régimen de corriente constante. | 199 |
| Figura 6.13: Factor de potencia durante el proceso de carga..... | 199 |
| Figura 6.14: Comportamiento del perfil de potencias (P, Q, S)..... | 200 |
| Figura 6.15: Condensador Arcotronics de 75 uF. | 201 |
| Figura 6.16: THDV para voltajes de línea..... | 202 |
| Figura 6.17: Distorsión armónica individual del 5to armónico para voltajes de línea..... | 203 |
| Figura 6.18: Forma de onda de voltaje – estación de carga en modo standby..... | 203 |
| Figura 6.19: THDi para corrientes de fase..... | 204 |
| Figura 6.20: Forma de onda de corriente - estación de carga en modo standby..... | 205 |
| Figura 6.21: TDD para corrientes de fase. | 206 |
| Figura 6.22: (a) THDi fase 1 y (b) TDD de la fase 1. | 207 |
| Figura 6.23: Distorsión armónica individual del 3er armónico para corrientes de fase. | 207 |
| Figura 6.24: Distorsión armónica individual del 5to armónico para corrientes de fase. | 208 |



Índice de tablas

| | |
|---|-----|
| Tabla 2.1: Estándares utilizados en el Sistema de Carga Combinada [44]. | 49 |
| Tabla 2.2: Ventajas y desventajas de los VE frente a los vehículos de MCI. | 56 |
| Tabla 2.3: Políticas relacionadas con VE en las principales potencias del mundo [3]. | 57 |
| Tabla 3.1: Componentes del arrastre aerodinámico [69]. | 72 |
| Tabla 4.1: Características técnicas del Kia Soul EV [80] [81]. | 81 |
| Tabla 4.2: Variables utilizadas en el estudio para la obtención de datos del VE. | 88 |
| Tabla 4.3: Variables que se obtienen del GPS Garmin Monterra. | 89 |
| Tabla 4.4: Variación de la densidad del aire según la altitud [112] [113]. | 98 |
| Tabla 4.5: Especificaciones técnicas del Kia Soul EV 2016 [115]. | 99 |
| Tabla 4.6: Eficiencias del VE. | 102 |
| Tabla 4.7: Límites de velocidad para vehículos livianos [118]. | 104 |
| Tabla 4.8: Porcentaje de error relativo en la ruta 1 de ida. | 107 |
| Tabla 4.9: Porcentaje de error relativo en la ruta 1 de regreso. | 108 |
| Tabla 4.10: Porcentaje de error relativo en la ruta 2 de ida. | 111 |
| Tabla 4.11: Porcentaje de error relativo en la ruta 2 de regreso. | 112 |
| Tabla 4.12: Valores de energía de la ruta recortada Cuenca – Molleturo / sin masa adicional. | 112 |
| Tabla 4.13: Porcentaje de error relativo en la ruta 3 de ida. | 115 |
| Tabla 4.14: Porcentaje de error relativo en la ruta 3 de regreso. | 117 |
| Tabla 4.15: Porcentaje de error relativo en la ruta 4 de ida. | 119 |
| Tabla 4.16: Porcentaje de error relativo en la ruta 4 de regreso. | 120 |
| Tabla 4.17: Valores de energía de la ruta recortada Cuenca - Cañar / con masa adicional. | 121 |
| Tabla 4.18: Porcentaje de error relativo en la ruta 5 de ida. | 123 |
| Tabla 4.19: Porcentaje de error relativo en la ruta 5 de regreso. | 124 |
| Tabla 5.1: Valores de energía utilizados en este estudio. | 133 |
| Tabla 5.2: Precios de instalación de una estación de carga rápida - nivel 3. | 137 |
| Tabla 5.3: Ponderación e indicadores de evaluación para el factor geográfico y de carretera. | 139 |
| Tabla 5.4: Ponderación e indicadores de evaluación para el factor eléctrico. | 139 |
| Tabla 5.5: Ponderación e indicadores de evaluación para el factor económico. | 139 |
| Tabla 5.6: Ponderación e indicadores de evaluación para el factor social. | 139 |
| Tabla 5.7: Ponderación e indicadores de evaluación para el factor ambiental. | 140 |
| Tabla 5.8: Ponderación e indicadores de evaluación para el factor de simulación: energía neta consumida entre la ciudad de partida y la EVCS adyacente. | 140 |
| Tabla 5.9: Ponderación e indicadores de evaluación para el factor de simulación: energía neta consumida entre dos EVCS. | 140 |



| | |
|--|-----|
| Tabla 5.10: Jerarquización de los factores y su ponderación relativa por sitio..... | 140 |
| Tabla 5.11: Ponderación total del escenario de estudio. | 141 |
| Tabla 5.12: Características generales de la provincia del Azuay y del Guayas [135] [136] [137]. | 142 |
| Tabla 5.13: Características ambientales generales de la ruta de estudio [147] [135] [136] [137]. | 145 |
| Tabla 5.14: Información general de las redes de distribución eléctrica en la ruta de estudio [149] [150]. | 146 |
| Tabla 5.15: Características eléctricas de los alimentadores en la ruta de estudio [149] [150]. | 147 |
| Tabla 5.16: Modelo general del servicio en baja tensión para sistemas trifásicos – E.E.R.C.S. [151]. | 149 |
| Tabla 5.17: Marcas y características de VE que se comercializan en Ecuador [152]. | 150 |
| Tabla 5.18: Requisitos generales de la EVCS..... | 152 |
| Tabla 5.19: Características técnicas de la EVCS – ABB Terra 54 CJG [154]. | 153 |
| Tabla 5.20: Dimensionamiento del transformador para la alimentación de la EVCS. | 155 |
| Tabla 5.21: Escenario base: consumo de energía obtenido mediante el modelo matemático (Matlab®) de la ruta de ida Cuenca – Guayaquil..... | 158 |
| Tabla 5.22: Escenario base: consumo de energía obtenido mediante el modelo matemático (Matlab®) de la ruta de regreso Guayaquil – Cuenca. | 159 |
| Tabla 5.23: Evaluación de la ubicación de la EVCS – Virgen del Cajas. | 163 |
| Tabla 5.24: Evaluación del factor geográfico y de carretera de la ubicación de la EVCS – Hierba Buena. | 165 |
| Tabla 5.25: Evaluación de la ubicación de la EVCS – Cerritos..... | 167 |
| Tabla 5.26: Ponderación promedio del escenario 1. | 169 |
| Tabla 5.27: Ponderación total del escenario 1..... | 169 |
| Tabla 5.28: Ponderación promedio del escenario 2. | 170 |
| Tabla 5.29: Ponderación total del escenario 2..... | 170 |
| Tabla 5.30: Ponderación promedio del escenario 3. | 171 |
| Tabla 5.31: Ponderación total del escenario 3..... | 171 |
| Tabla 5.32: Ponderación promedio del escenario 4. | 172 |
| Tabla 5.33: Ponderación total del escenario 4..... | 172 |
| Tabla 5.34: Ponderación promedio del escenario 5. | 173 |
| Tabla 5.35: Ponderación total del escenario 5..... | 173 |
| Tabla 5.36: Ponderación promedio del escenario 6. | 174 |
| Tabla 5.37: Ponderación total del escenario 6..... | 174 |
| Tabla 5.38: Ponderación promedio del escenario 7. | 175 |
| Tabla 5.39: Ponderación total del escenario 7..... | 175 |
| Tabla 5.40: Ponderación promedio del escenario 8. | 176 |
| Tabla 5.41: Ponderación total del escenario 8..... | 176 |
| Tabla 5.42: Ponderación promedio del escenario 9. | 177 |



| | |
|--|-----|
| Tabla 5.43: Ponderación total del escenario 9..... | 177 |
| Tabla 5.44: Ponderación promedio del escenario 10..... | 178 |
| Tabla 5.45: Ponderación promedio del escenario 10..... | 178 |
| Tabla 5.46: Ponderación promedio del escenario 11..... | 179 |
| Tabla 5.47: Ponderación total del escenario 11..... | 179 |
| Tabla 5.48: Cuadro resumen de los escenarios analizados. | 180 |
| Tabla 6.1: Parámetros de los armónicos. | 188 |
| Tabla 6.2: Límites máximos de armónicos de voltaje (% del voltaje nominal) [162]..... | 193 |
| Tabla 6.3: Niveles máximos de distorsión armónica de corriente [162]. | 193 |
| Tabla 6.4: Cumplimiento del límite de armónicos. | 208 |



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Jorge Andrés Paute Torres en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Desarrollo de una metodología para la ubicación de estaciones de carga de vehículos eléctricos, caso de estudio: ruta Cuenca - Guayaquil", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 12 de octubre de 2020

Jorge Andrés Paute Torres

C.I: 1105864712



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

María Emilia Sempértegui Moscoso en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Desarrollo de una metodología para la ubicación de estaciones de carga de vehículos eléctricos, caso de estudio: ruta Cuenca – Guayaquil", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 12 de octubre de 2020

María Emilia Sempértegui Moscoso

C.I: 0104110317



Cláusula de Propiedad Intelectual

Jorge Andrés Paute Torres, autor del trabajo de titulación "Desarrollo de una metodología para la ubicación de estaciones de carga de vehículos eléctricos, caso de estudio: ruta Cuenca - Guayaquil", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 12 de octubre de 2020

Jorge Andrés Paute Torres

C.I: 1105864712



Cláusula de Propiedad Intelectual

María Emilia Sempértegui Moscoso, autora del trabajo de titulación "Desarrollo de una metodología para la ubicación de estaciones de carga de vehículos eléctricos, caso de estudio: ruta Cuenca – Guayaquil", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 12 de octubre de 2020

María Emilia Sempértegui Moscoso

C.I: 0104110317



Agradecimientos

Agradecemos al PhD. Luis González y al PhD. Juan Leonardo Espinoza por su tiempo, guía y apoyo durante la elaboración de este trabajo.

Al Sr. Pablo Delgado, por brindarnos su tiempo y apoyo durante los primeros meses de elaboración de este documento.

A la Universidad de Cuenca, fiel defensora de la educación pública, y a aquellos docentes de la Facultad de Ingeniería que han alimentado sabiamente no solo nuestras mentes, sino también nuestros corazones.



Dedicatoria

Dedico este trabajo de tesis a mi familia, por su apoyo, paciencia, y amor incondicional.

A mis compañeros de universidad, con quienes hemos compartido hazañas académicas, y momentos llenos de alegría, razón por la cual les deseo de todo corazón una vida llena de éxitos y salud.

Jorge Andrés Paute Torres

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, Rodrigo Sempértegui y Susana Moscoso por su trabajo, sacrificio y apoyo durante toda la carrera universitaria.

A mi hermano Rodrigo, por ser un apoyo fundamental a lo largo de mi vida.

A mis abuelos, Rubén, Sara y María de Lourdes por su cariño constante.

A Luis Ordoñez, por el amor, cariño y apoyo incondicional durante este tiempo.

A mi familia y amigos por acompañarme a lo largo de este proceso.

María Emilia Sempértegui Moscoso



Abreviaturas

| | |
|--------------------|--|
| VE: | Vehículo(s) eléctrico(s) |
| MCI: | Vehículo(s) con motor de combustión interna |
| BEV: | Vehículo(s) eléctrico(s) de batería |
| PEV: | Vehículo(s) eléctrico(s) enchufable(s) |
| HEV: | Vehículo(s) eléctrico(s) híbrido(s) |
| PHEV: | Vehículo(s) eléctrico(s) híbrido(s) enchufable(s) |
| FCEV: | Vehículo(s) eléctrico(s) de pila de combustible |
| IEC: | Comisión Electrotécnica Internacional |
| SI: | Sistema Internacional |
| SoC: | Estado de carga de la batería |
| EVCS: | Estación(es) de carga para vehículos eléctricos |
| SAE: | Sociedad de Ingenieros Automotrices |
| NEC: | Código Eléctrico Nacional |
| V2G: | Del vehículo a la red |
| EPCU: | Unidad de control de energía eléctrica |
| LDC: | Convertidor DC-DC de baja potencia |
| OBC: | Cargador integrado: equipo de carga de batería (AC/DC) |
| NEDC: | Nuevo ciclo de conducción europeo |
| DTC: | Lectura de códigos de falla |
| CAN bus: | Red de área de control |
| ISO: | Organización Internacional de Normalización |
| EPA: | Agencia de protección medioambiental |
| E.E.R.C.S.: | Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A |
| CNEL EP: | Corporación Nacional de Electricidad - Empresa Pública |
| AEADE: | Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador |
| AC: | Corriente alterna |
| DC: | Corriente continua |
| ARCONEL: | Agencia de Regulación y Control de Electricidad |
| MERNNR: | Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables |
| ECU: | Unidad de control electrónico |



| | |
|--------------|--|
| PIDs: | Códigos de información de parámetros |
| OBD: | Sistema de diagnóstico a bordo |
| BMS: | Sistema de gestión de batería |
| GPS: | Sistema de posicionamiento global |
| ARCH: | Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero |
| MTOP: | Ministerio de Transporte y Obras Públicas |
| THD: | Tasa de distorsión armónica |
| TDD: | Distorsión de demanda total |
| FP: | Factor de potencia |
| SCR: | Relación de corto circuito |
| PCC: | Punto común de acoplamiento |



Capítulo 1. Planteamiento de la tesis

1.1. Antecedentes

Aunque no es un aspecto muy conocido, los primeros automóviles fueron eléctricos. A lo largo del siglo XIX diversos inventores desarrollaron prototipos de vehículos eléctricos (VE) a escala [1], y durante los primeros años del siglo XX, los vehículos eléctricos tuvieron un relativo éxito comercial debido a su fácil manejo; sin embargo, presentaban la desventaja de tener una limitada autonomía, relacionada con la capacidad de almacenamiento de energía de sus baterías.

En 1908, el empresario estadounidense Henry Ford introduce al mercado automovilístico el vehículo de combustión interna Ford modelo T, el cual fue el primer vehículo fabricado bajo un sistema de producción en cadena de montaje. Este modelo de vehículo comenzó a ganar relevancia debido al boom petrolero de aquella época, y gracias al desarrollo de los primeros procesos de refinamiento para los combustibles fósiles. A finales de 1930, la industria de VE había desaparecido por completo y no es hasta inicios del siglo XXI que esta tecnología vehicular vuelve a tener relevancia, debido a la actual concientización del cambio climático [1].

En el año de 1996, la industria de VE quiso resurgir con el modelo EV1 de General Motors, pero no fue hasta el año 2008, donde la empresa Tesla lanza al mercado su primer vehículo eléctrico, devolviendo nuevamente un papel protagónico a esta tecnología vehicular. Desde entonces, se han observado grandes avances en la ciencia de los materiales, permitiendo que la capacidad de almacenamiento de las baterías sea cada vez mayor. Gracias a esto, se ha observado una disminución de los precios de las baterías: en 2017 el costo por kWh era de hasta \$300, y se espera que para el año 2025 ronde los \$100. Otro factor determinante en el mercado de los vehículos eléctricos es la infraestructura de carga, la que se espera que para el 2025 disminuya en un 40 % sus costos, facilitando su implementación y masificación. Además, las reducciones de los costos operacionales parecen compensar las diferencias iniciales de precio entre los VE y los de combustión interna [2].



La transición a la movilidad eléctrica ha crecido exponencialmente en los últimos años. En 2018, la flota mundial de VE superó los 5.1 millones, teniendo un aumento de 2 millones respecto al año 2017. China siguió siendo el mercado de VE más grande del mundo, con casi 1.1 millones de vehículos vendidos en 2018 y, con 2.3 millones de unidades, representó casi la mitad del stock mundial de VE. Europa siguió con 1.2 millones de VE y Estados Unidos con 1.1 millones en la carretera a finales de 2018, teniendo un crecimiento del mercado de 385000 y 361000 VE con respecto al año anterior [3].

A lo largo de esta década, diversas acciones y avances se han dado en el tema de la electromovilidad en la región Latinoamericana y del Caribe, en países como Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, México, Paraguay y Uruguay, con una evolución más rápida en unos países que en otros, pero en todos son visibles las gestiones para lograr una mayor adopción en la utilización de vehículos eléctricos en el corto y mediano plazo [2].

México posee la mayor red de infraestructura de carga en la región Latinoamericana, con más de 900 cargadores en distintas ciudades. Así mismo, se ha avanzado en proyectos de corredores viales verdes, como es el caso efectivo de la ruta eléctrica en Uruguay, y se han propuesto proyectos similares en Brasil, Argentina, México y Paraguay [2].

Ecuador actualmente cuenta con un extenso repertorio de fomentos fiscales que seguirán impulsando el despliegue de la movilidad eléctrica, como es la reducción arancelaria a la importación de VE, baterías y cargadores, el Esquema Tarifario para la introducción de los Vehículos Eléctricos comprendido en la Resolución No. ARCONEL-038/15, la Ley Orgánica de Eficiencia Energética y el Proyecto de Ley de Fomento a la Movilidad Sostenible y Desarrollo de la Electromovilidad. Sin embargo, algunos de sus principales desafíos son definir un plan nacional de infraestructura de carga con agentes concretos que lo encaren, ajustar aspectos de nomenclatura sobre vehículos eléctricos e híbridos, así como la ampliación de la oferta disponible de vehículos con este tipo de tecnologías.



Las estadísticas de la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE) indican que hasta junio del presente año sólo se han vendido 468 VE [4], este bajo índice de penetración se debe a que existen dificultades técnicas, sociales y económicas que impiden a este tipo de transporte ser ampliamente comercializado, entre ellas: el rechazo al uso tecnologías más eficientes, costo elevado de los VE, falta de socialización sobre la electromovilidad y falta de infraestructura de recarga, ya que por el momento existen pocas estaciones de carga y solo en algunas ciudades del país como Quito, Ambato, Guayaquil, Cuenca, Santa Rosa y Loja [5] que suministran energía eléctrica para el recorrido interno y hasta el radio de alcance de la autonomía de los VE; sin embargo, la empresa Frost & Sullivan realizó estimaciones hacia 2025 y espera que en Ecuador el mercado total de vehículos eléctricos pueda alcanzar las 14950 unidades [2].

1.2. Justificación

Actualmente en el país, el mercado de vehículos eléctricos aún no ha despegado, ya que existe una baja presencia de estos vehículos como consecuencia de la falta de confianza de los potenciales clientes debido a la autonomía de los VE y a que no existe el suficiente despliegue de una red de infraestructura de carga en las ciudades y carreteras del país, ya que se necesita una fuerte inversión económica para garantizar la fidelidad de este nuevo servicio.

En el caso de las carreteras, las estaciones de carga rápida son necesarias para satisfacer las necesidades de demanda de energía de los usuarios de VE cuando se realizan viajes fuera de la ciudad.

En el país existen algunos estudios que muestran las potenciales ubicaciones de estaciones de carga en algunos puntos del casco urbano de las principales ciudades del país; sin embargo, el estudio de la localización de estaciones en las carreteras es un punto importante a seguir desarrollando ya que la falta de disponibilidad de estaciones de carga rápida en vías interprovinciales y/o



intercantonaes restringe a los usuarios el uso de los vehículos únicamente en las ciudades.

Es por esta razón, que el presente trabajo desarrolla una metodología para la ubicación de estaciones de carga en carreteras mediante un modelo matemático que permite estimar el consumo energético de un vehículo eléctrico, tomando como caso de estudio la ruta Cuenca – Guayaquil, por la vía Colectora Cuenca – Puerto Inca (E582).

Este estudio servirá como base para desarrollar la metodología en otras rutas interprovinciales del país y como herramienta para la expansión del parque automotor eléctrico nacional.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Desarrollo de una metodología para la ubicación de estaciones de carga de vehículos eléctricos, caso de estudio: ruta Cuenca – Guayaquil, como herramienta para la expansión del parque automotor eléctrico del país.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar y recopilar información relevante acerca de los vehículos eléctricos en el contexto local y global, las infraestructuras, modos de carga, importancia de las estaciones de carga, criterios más importantes a considerar para la ubicación de las estaciones de carga y las políticas de incentivos aplicadas en el país.
- Implementar un modelo matemático que permita determinar el consumo energético de un vehículo eléctrico, e incorporarlo en un código de programación haciendo uso de un software computacional para poder simularlo, y comparar este modelo con los datos obtenidos mediante el uso en campo del vehículo eléctrico disponible en el Laboratorio de Microrred Eléctrica Campus – Balzay de la Universidad de Cuenca.



- Elaborar un mapa de la ubicación de estaciones de carga en base a factores técnicos, económicos, sociales y ambientales, en la ruta entre las ciudades de Cuenca y Guayaquil.

1.4. Alcance

La metodología propuesta en este estudio permite identificar la potencialidad de los sitios para la implementación de estaciones de carga rápida para vehículos eléctricos en la ruta Cuenca – Guayaquil vía Colectora E582, mediante un modelo matemático “cuasi-estacionario” que permite estimar el consumo energético de un VE entre dos ubicaciones. El modelo es implementado con base en las características técnicas del vehículo eléctrico Kia Soul 2016 de 27 kWh, teniendo en cuenta una masa promedio de 345 kg (equivalente a estar con todos sus ocupantes).

A partir del modelo matemático y consideraciones iniciales (estado de carga de la batería del vehículo), las cuales deben plantearse buscando no sobredimensionar la red de infraestructura de carga, se obtienen diferentes escenarios que permiten identificar las potenciales ubicaciones para la implementación de las estaciones de carga. Para determinar la viabilidad de las ubicaciones se establecen factores geográficos, eléctricos, económicos, sociales, y ambientales; así como los criterios asociados a cada uno de ellos, los cuales son ponderados por sitio seleccionado, con base a indicadores cuantitativos y cualitativos que se plantean en este estudio. Además, se considera un factor de simulación que se pondera por escenario, el cual tiene en cuenta la energía neta que consume el vehículo entre dos puntos (ciudad → estación o entre estaciones).

Finalmente, se analizan los resultados de cada uno de los escenarios planteados, se clasifican según el tipo de infraestructura de carga (robusta, media, y mínima), y se seleccionan a los escenarios con mejor puntuación para cada tipo de infraestructura.

Por último, se desarrolla el estudio del comportamiento de una estación de carga rápida con salida en DC, mientras se encuentra operando a plena carga y



en modo standby, para analizar el impacto en la calidad de energía de la red eléctrica de distribución, como parte de la ponderación de uno de los criterios del factor eléctrico establecido en el estudio.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1. Introducción

En la actualidad, los vehículos eléctricos son considerados como una tecnología prometedora para la reducción del consumo de combustibles fósiles, con la finalidad de disminuir la emisión de gases de efecto invernadero y la contaminación del aire local; es por esto que es importante conocer algunos conceptos básicos sobre esta tecnología vehicular, por lo que en este capítulo se presenta información relacionada con su historia, autonomía, modos de carga, tipo de conectores, ventajas, desventajas, y la situación y normativa nacional sobre estos vehículos.

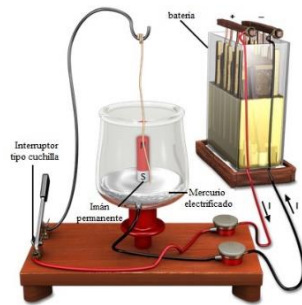
2.2. Evolución del vehículo eléctrico

Los VE son un tipo de tecnología que ha venido evolucionando a lo largo del tiempo gracias a las invenciones de científicos que buscaban nuevas alternativas de transportación a las existentes en la época (motor de vapor), presentándose los primeros prototipos mucho antes que los motores de combustión.

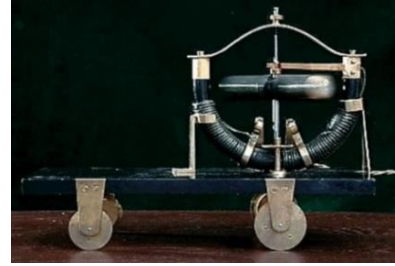
En 1680, Sir Isaac Newton ideó un vehículo propulsado por la reacción de vapor de agua, pero no fue hasta 1769 que el inventor francés Nicolas Joseph Cugnot materializaría esta idea construyendo el primer vehículo autopropulsado, siendo este el punto de partida para el desarrollo de diferentes modelos de vehículos [6].

Es así que, a principios del siglo XIX, el físico-químico británico Michael Faraday descubre el fenómeno conocido como inducción electromagnética y es en 1821 cuando inventa el dispositivo de rotación electromagnética, ver figura 2.1 (a), el cual es precursor del motor eléctrico [6].

En 1828, el ingeniero húngaro Anyos Jedlik construyó el primer modelo de vehículo eléctrico que consistía en un motor eléctrico acoplado en una maqueta, como se observa en la figura 2.1 (b).



(a) Motor de Faraday [7].



(b) Maqueta de locomotora eléctrica [8].

Figura 2.1: Experimentos que contribuyen en la evolución del vehículo eléctrico.

Entre 1832 y 1839, el inventor escocés Robert Anderson inventó y construyó el primer vehículo eléctrico que consistía en un carruaje impulsado por un motor eléctrico, el cual era alimentado por baterías no recargables, lo que representaba una desventaja para la autonomía vehicular. Es por esto que, en 1859, el físico francés Gaston Planté inventa la batería recargable de plomo ácido y en 1881 su compatriota Camille Faure mejora la capacidad de almacenamiento de la misma [9].

En 1884, el inventor inglés Thomas Parker desarrolló varios modelos de automóviles eléctricos, uno de ellos se observa en la figura 2.2 (a), el cual era comercialmente viable para ser producido en masa en Inglaterra; este vehículo solo podía circular legalmente a 2.5 km/hora en carreteras rurales y a 1.25 km/hora en la ciudad [10].

En 1894, se diseñó y creó el primer vehículo eléctrico en Estados Unidos llamado “Electrobat” por el ingeniero mecánico Henry Morris y el químico Pedro Salom en Filadelfia, Pensilvania. Se trató del primer vehículo eléctrico comercial, y fue operado como un taxi en la ciudad de Nueva York por la compañía “Morris & Salom Electric Carriage and Wagon Company”. En la figura 2.2 (b) se observa este vehículo, el cual era alimentado por dos motores de 1.1 kW que alcanzaban una velocidad máxima de 32 km/hora, autonomía de 40 km y podía usarse durante tres turnos de 4 horas con periodos de recarga de 90 minutos [11].

En 1898, el ingeniero austriaco Ferdinand Porsche presentó el vehículo eléctrico “Egger-Lohner Model C.2 Phaeton”, mejor conocido como Porsche P1,

como se muestra en la figura 2.2 (c). Este vehículo ofrecía una potencia entre 2.2 kW y 3.7 kW, alcanzando una velocidad máxima de 37 km/hora con una autonomía máxima de 80 kilómetros [12].

En 1899, el vehículo eléctrico "La Jamais Contente" fue el más importante de la época al romper el record de velocidad en tierra en la ciudad de Achères, cerca de Paris, Francia, al superar los 100 km/hora. Este vehículo, el cual se observa en la figura 2.2 (d), fue construido y pilotado por el belga Camille Jenatzy [11].



(a) Primer vehículo eléctrico en Inglaterra [10].



(b) Electrobat [13].



(c) Vehículo eléctrico Porsche P1 [14].



(d) Vehículo eléctrico "La Jamais Contente" [15].

Figura 2.2: Evolución del vehículo eléctrico.

Es así que, cuando el vehículo eléctrico se encontraba en su mayor apogeo, el empresario estadounidense Henry Ford presentó el vehículo de combustión Ford Modelo T (ver figura 2.3), el cual incorporaba un nuevo modelo de motor más potente. El vehículo disponía de ventajas como: facilidad de manejo, mayor autonomía, bajo costo y podía ser fabricado en masa. Este precedente contribuyó a que comenzara a desaparecer la fabricación de vehículos eléctricos, finalizando ésta después de la primera guerra mundial [11].



Figura 2.3: Ford Modelo T [16].

Entre 1960 y 1970, debido los problemas originados por la preocupación del agotamiento del petróleo, el embargo del petróleo a los principales mercados del mundo por parte de los países productores de petróleo y la contaminación atmosférica, se reanudó la fabricación de vehículos eléctricos, siendo el “Lunar Roving”, mostrado en la figura 2.4 (a), el vehículo eléctrico más significativo de la época empleado por los astronautas en las misiones Apolo 15, 16 y 17 para el desplazamiento lunar, el cual tenía una autonomía de aproximadamente 65 km [11].

En 1990 el estado de California aprueba el mandato de “Vehículos Cero Emisiones” conocido como ZEV, por sus siglas en inglés, el cual tiene como objetivo disminuir la cantidad de emisiones de gases contaminantes y exigir que los fabricantes de vehículos vendan un cierto porcentaje de vehículos eléctricos cada año. Esto impulsó a que conocidas marcas de automóviles reanuden la fabricación de vehículos eléctricos e impulsen la investigación sobre vehículos eléctricos híbridos [17].

Es así que entre 1996 y 1999, General Motors produjo su primer auto eléctrico moderno en Estados Unidos, conocido como “EV1”, mostrado en la figura 2.4 (b). La autonomía en su primera versión fue de 113 km y en su última versión producida alcanzó los 257 km. Este vehículo estaba equipado con baterías de Níquel Hidruro-Metálico (Ni-MH), y podía alcanzar una velocidad máxima de 130 km/hora [18].

A lo largo de la historia, los VE se han presentado como una alternativa de transporte seguro y amigable con el ambiente, pero su desarrollo se ha visto

frenado por diversos factores sociales, económicos y técnicos, de cada una de las épocas. Desde el siglo XIX, cuando los VE pasaron de tener una autonomía de unos pocos kilómetros a tener valores cercanos a los 257 km, como en el caso del vehículo EV1, hasta los últimos 20 años donde este valor de autonomía se ha duplicado en modelos como el Tesla Model 3, mostrado en la figura 2.4 (c), que puede recorrer distancias de aproximadamente 518 km [19].

Por esto y más, para que los VE se conviertan en una alternativa óptima para el transporte es necesario reformas políticas nacionales e internacionales que incentiven el uso de este tipo de tecnología, sobre todo con las baterías y el incremento de potencias de carga en cada una de las estaciones, además del apoyo de varias entidades académicas que desarrollen normativas técnicas y de seguridad enfocadas a la estandarización de los diversos componentes que conforman los vehículos eléctricos.



(a) Vehículo eléctrico "Lunar Roving" [20].



(b) General Motors EV1 [21].



(c) Tesla Model 3 [22].

Figura 2.4: Vehículos eléctricos que marcaron y marcan tendencia en la actualidad.

2.3. Clasificación de la tecnología vehicular

La tecnología vehicular se divide en dos grupos: los vehículos con motor de combustión interna (MCI) y los vehículos con motor eléctrico.

Los VE se clasifican según su arquitectura y la fuente de energía usada para propulsar el automóvil. Existen cuatro tipos de VE: vehículo eléctrico de batería (BEV), vehículo eléctrico híbrido (HEV), vehículo eléctrico híbrido enchufable (PHEV) y vehículo eléctrico de pila de combustible (FCEV), cada uno con sus ventajas y limitaciones en términos de densidad de energía, potencia, tasa de emisiones, eficiencia del combustible, peso, tamaño, costos y seguridad.

2.3.1. Vehículo de combustión interna

Es un vehículo convencional que utiliza un motor de combustión interna, el cual genera energía mecánica a partir de la transformación de la energía química de un combustible de alta densidad energética derivado del petróleo. El combustible se quema en una cámara combustión que produce una potencia mecánica transferida al sistema de transmisión mecánica para impulsar el vehículo [23], como se muestra en la figura 2.5.

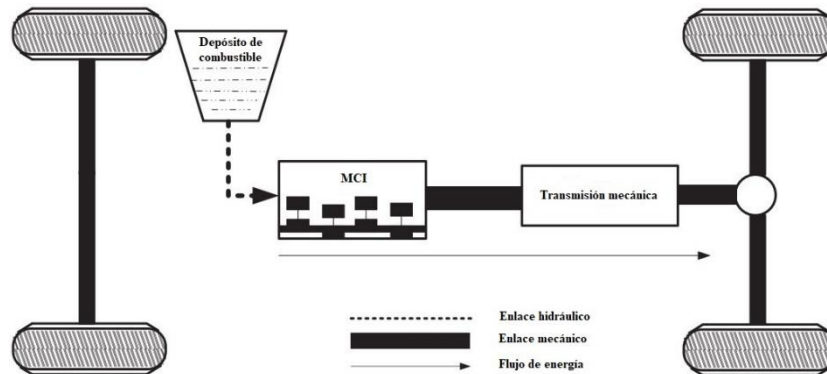


Figura 2.5: Estructura del vehículo con motor de combustión interna [23].

La ventaja de estos vehículos es que pueden realizar largos recorridos por la alta densidad energética de los hidrocarburos, además de abastecerse de combustible en estaciones de servicio en pocos minutos; mientras que las desventajas son la poca eficiencia al convertir el combustible en energía útil (entre el 17 % y 21 % [24]) y la excesiva emisión de contaminantes (CO_x, NO_x, HC) que contribuyen al cambio climático y afectan a la salud.

2.3.2. Vehículo eléctrico de batería (BEV)

Son vehículos totalmente eléctricos que cuentan con un banco de baterías recargables que se utiliza para hacer funcionar al motor eléctrico, cargas auxiliares y a los dispositivos electrónicos encargados de diversas funciones a bordo del vehículo. El banco de baterías se carga mediante la conexión a una fuente de energía eléctrica o mediante el sistema de frenado regenerativo [23]. En la figura 2.6 se muestra una arquitectura simplificada del BEV.

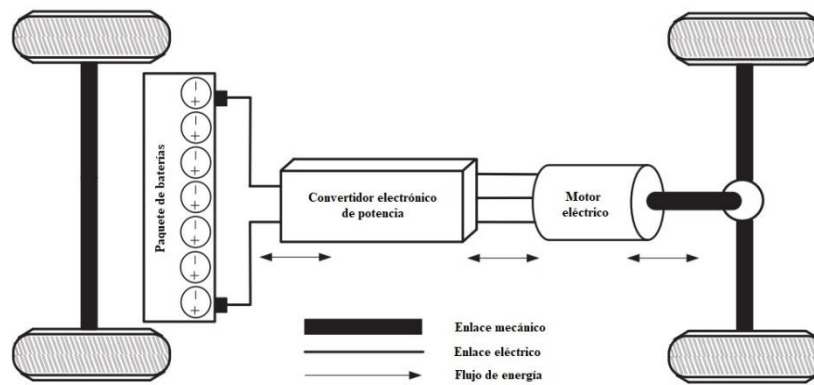


Figura 2.6: Estructura del vehículo eléctrico de batería [23].

Las ventajas que presentan este tipo de vehículos son: no emiten gases contaminantes debido a que no utilizan combustibles fósiles, mayor comodidad y seguridad a los usuarios, menor contaminación auditiva, el sistema de propulsión eléctrica puede extraer la energía de la batería con un 90 % de eficiencia y tienen la capacidad de recuperar energía a través del sistema de frenado regenerativo [23].

La limitación que presentan los BEV es su autonomía, la cual depende del rango de operación del ciclo de carga de la batería [23].

2.3.3. Vehículo eléctrico híbrido (HEV)

Este tipo de vehículo cuenta con dos o más fuentes de energía (combustibles fósiles, pila de combustible - hidrógeno y batería química) y cada fuente con su correspondiente convertidor de energía [23].

Según el Comité Técnico 69 (Vehículos eléctricos de carretera) de la Comisión Internacional Electrotécnica, “un vehículo eléctrico híbrido es un vehículo en el que al menos uno de los convertidores puede suministrar energía eléctrica” [23].

En la actualidad los HEV funcionan con combustibles fósiles a través de un motor de combustión interna y un motor eléctrico que utiliza la energía almacenada en una batería que se carga mediante el sistema de frenado regenerativo. El vehículo híbrido no se puede conectar a una red eléctrica para la carga de la batería.

Los HEV constan de un tren de transmisión conformado por no más de dos trenes de potencia, ya que la combinación de la tecnología del automóvil con la tecnología eléctrica incrementa el grado de complejidad en el sistema de control, por lo que es necesario gestionar y controlar el flujo de energía hasta la carga de forma óptima por medio del estudio de modos de operación, cada uno con su ruta de flujo de energía [23]. En la figura 2.7, se muestran las diferentes direcciones de flujos de energía en HEV, donde la fuente A puede ser gasolina, diésel e hidrógeno de naturaleza unidireccional y la fuente B puede ser baterías o supercapacitores de naturaleza bidireccional.

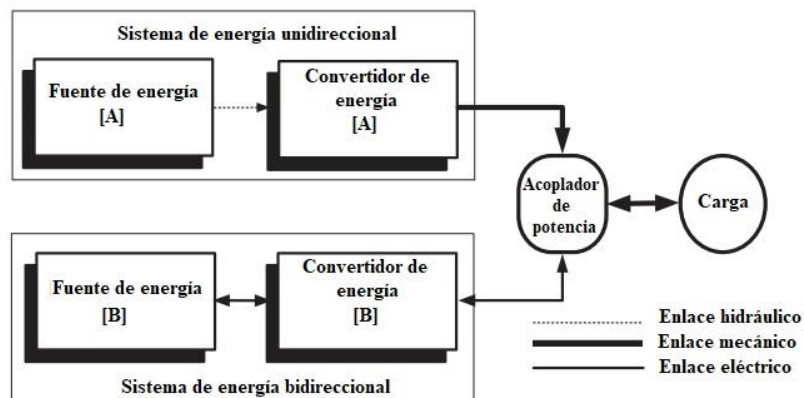


Figura 2.7: Dirección de los flujos de energía en vehículos eléctricos híbridos [23].

Las combinaciones de los modos de operación pueden ser:

- **Modo 1:** solo se encuentra la fuente de energía A suministrando energía a la carga.
- **Modo 2:** solo se encuentra la fuente de energía B suministrando energía a la carga.
- **Modo 3:** las dos fuentes de energía A y B suministran energía a la carga.
- **Modo 4:** la fuente de energía B extrae energía de la fuente de energía A.
- **Modo 5:** la fuente de energía B extrae energía de la carga en el momento de frenado (frenado regenerativo).
- **Modo 6:** la fuente de energía A suministra energía a la fuente de energía B y la carga simultáneamente.

- **Modo 7:** la fuente de energía B extrae energía de la fuente de energía A y carga simultáneamente.
- **Modo 8:** la fuente de energía A suministra energía a la fuente de energía B, y la fuente de energía B suministra a la carga.
- **Modo 9:** la fuente de energía A suministra energía a la carga y la carga, a su vez, suministra energía a la fuente de energía B.

Los HEV se clasifican en cuatro tipos: serie híbrido, paralelo híbrido, serie/paralelo híbrido y complejo híbrido.

2.3.3.1. Vehículo eléctrico híbrido – serie

Son la forma más simple de los VEH, en los que el motor eléctrico es el responsable de impulsar el vehículo por medio del generador eléctrico o el banco de baterías [23]. Como se muestra en la figura 2.8, la arquitectura del vehículo consta de un motor de combustión interna acoplado al generador eléctrico, el cual se encarga de transformar la energía mecánica en energía eléctrica, este generador se conecta a un convertidor electrónico y este a su vez a un banco de baterías químicas y al motor eléctrico.

El encendido/apagado del motor de combustión interna se controla mediante el estado de carga de la batería (SoC, por sus siglas en inglés). El sistema de control enciende el motor de combustión interna cuando el estado de la batería se encuentra en un estado mínimo preestablecido y se apaga cuando alcanza un estado de carga máximo [23].

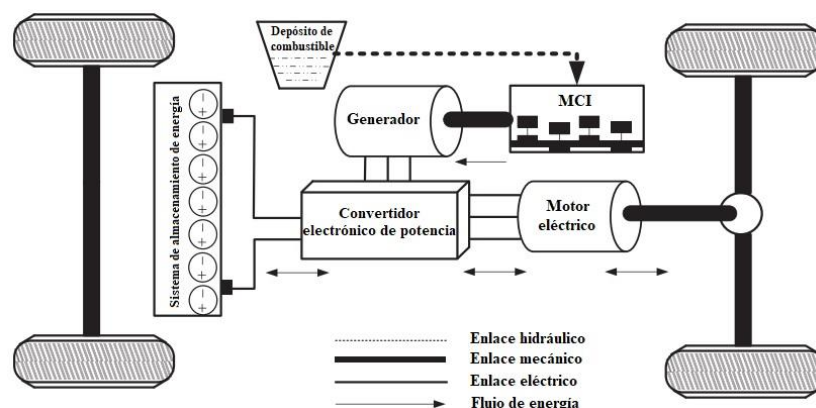


Figura 2.8: Estructura del vehículo eléctrico híbrido - serie [23].

2.3.3.2. Vehículo eléctrico híbrido – paralelo

Como se observa en la figura 2.9, el motor de combustión interna y el motor eléctrico se encuentran conectados paralelamente y están acoplados mecánicamente para transmitir la energía mecánica al tren de transmisión conectado a las llantas delanteras o traseras (eje simple) e impulsar el vehículo.

En esta configuración, el vehículo puede funcionar en los modos de operación del 1 al 6, en donde la fuente de energía A es el combustible y la fuente de energía B es la batería. Estos modos permiten optimizar las fuentes de energía, ya que el motor eléctrico opera a velocidades bajas mientras que el motor de combustión interna a velocidades más altas para trabajar en un punto más eficiente, lo que contribuye a optimizar el consumo del combustible y reducir las emisiones de gases contaminantes [23].

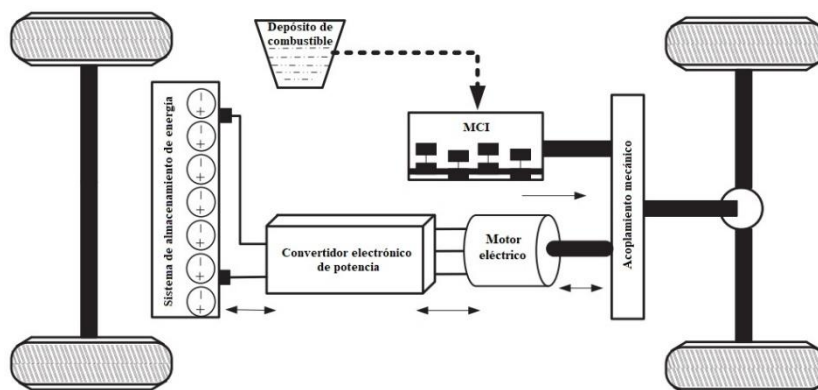


Figura 2.9: Estructura del vehículo eléctrico híbrido - paralelo [23].

2.3.3.3. Vehículo eléctrico híbrido – serie/paralelo

Como se observa en la figura 2.10, esta configuración del vehículo es el resultado de la integración de la configuración serie y paralelo, su operación puede ser: eléctrica intensiva, en donde el motor eléctrico predomina sobre el motor de combustión interna; mecánica intensiva, en donde el motor de combustión interna es el que predomina, o la combinación de los dos en distintos porcentajes de funcionamiento, logrando una mayor eficiencia del vehículo [23].

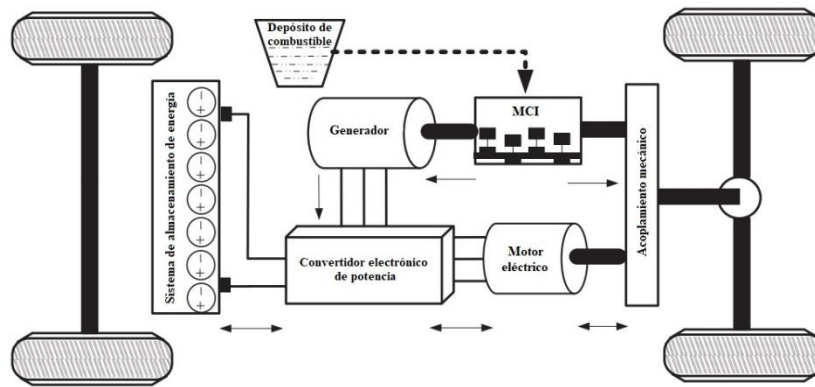


Figura 2.10: Estructura del vehículo eléctrico híbrido – serie/paralelo [23].

Como se muestra en la figura 2.11, esta configuración implementa un sistema de propulsión de doble eje a diferencia de las configuraciones mencionadas anteriormente. En este tipo de arquitectura, tanto los ejes de las ruedas delanteras como traseras se encuentran desacoplados entre sí y se encargan de impulsar el vehículo [23].

Este tipo de configuración ofrece una mayor flexibilidad y confiabilidad. Por otra parte, el vehículo híbrido complejo permite que las llantas delanteras sean impulsadas por un sistema híbrido y que las llantas traseras sean impulsadas por el sistema eléctrico o viceversa [23].

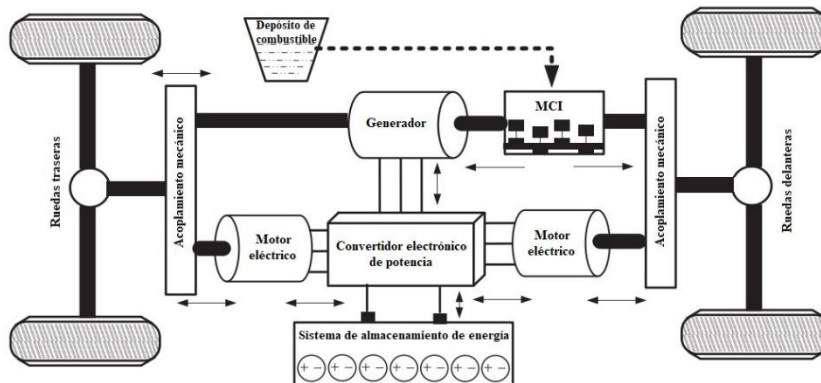


Figura 2.11: Estructura del vehículo eléctrico híbrido complejo [23].

2.3.4. Vehículo eléctrico híbrido enchufable (PHEV)

Se trata de un vehículo con motor de combustión interna y motor eléctrico (serie o paralelo); además, cuenta con un banco de baterías que puede ser recargado a través del frenado regenerativo o mediante la conexión a un punto

de suministro eléctrico en la red de distribución [23], como se observa en la figura 2.12.

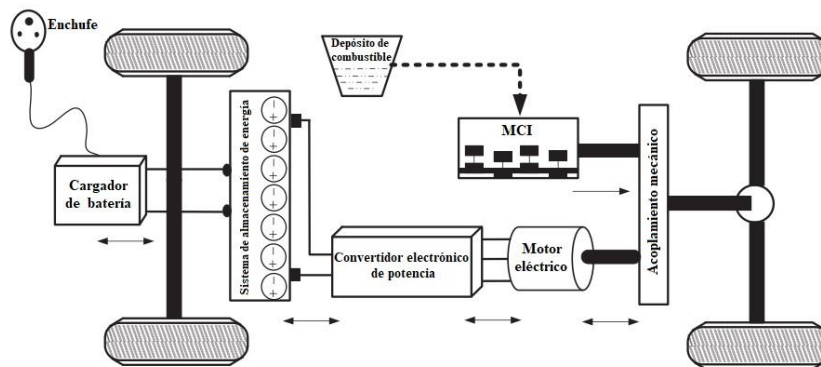


Figura 2.12: Estructura del vehículo eléctrico híbrido enchufable [23].

2.3.5. Vehículo eléctrico de pila de combustible (FCEV)

Se trata de un vehículo que incorpora un tanque de hidrógeno, en el cual se realiza un proceso electroquímico a partir de la reacción del oxígeno del aire e hidrógeno para producir energía eléctrica, y obtener vapor de agua que es expulsado por el tubo de escape; la energía final se utiliza para impulsar el vehículo [23].

Las ventajas de estos vehículos son: eliminación de gases contaminantes, no necesitan de combustibles fósiles inflamables y mayor seguridad.

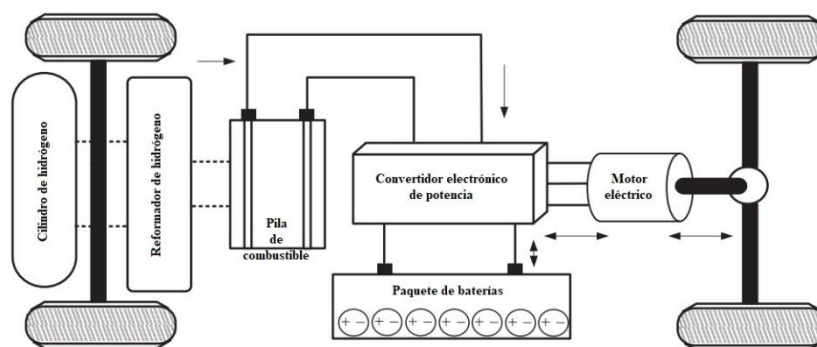


Figura 2.13: Vehículo eléctrico de pila de combustible [23].

2.4. Autonomía de los vehículos eléctricos

La autonomía es la máxima distancia que puede recorrer un vehículo eléctrico antes de detenerse para recargar las baterías.

La autonomía de los vehículos eléctricos depende de [25]:



- Capacidad de almacenamiento de las baterías según el tipo de tecnología que se use.
- Masa total del vehículo, que se refiere al número de pasajeros y cantidad de carga que se transporte, al igual que la cantidad de sistemas auxiliares que se utilice como: faros, calefacción, radio, etc. Cuanto más peso tenga el vehículo más potencia por kilómetro se necesitará por lo que la autonomía se verá reducida.
- Tipo de conducción, que se refiere a los cambios de velocidad que realice el conductor, los cuales están influenciados por el estilo de conducción, topografía del terreno, límites de velocidad, condiciones de tráfico y de las condiciones meteorológicas que se presenten.

2.5. Tipos de recarga de un vehículo eléctrico

Los tipos de recarga de los VE se clasifican en base al nivel de potencia que proporciona el equipo para recargar la batería de los vehículos eléctricos enchufables (PEV), lo que influye directamente en el tiempo de carga. Se distinguen tres tipos: Nivel 1 (carga lenta), Nivel 2 (carga semi-rápida) y Nivel 3 (carga rápida), con base en la publicación de la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) “SAE Surface Vehicle Recommended Practice J1772, SAE Electric Vehicle Conductive Charge Coupler” [26].

2.5.1. Recarga lenta – Nivel 1

En el nivel 1 de recarga, el equipo de suministro eléctrico del vehículo requiere un enchufe doméstico en corriente alterna según el Código Eléctrico Nacional (NEC, por sus siglas en inglés), por lo que puede ser utilizado en cualquier punto de red que cuente con este enchufe (sector residencial, lugares de trabajo y públicos). Los PEV cuentan con un juego de cables portátiles como se muestra en la figura 2.14, en donde en uno de sus extremos se encuentra el enchufe doméstico de dos o tres clavijas (Schuko o Conector Nema 5-15) y en el otro extremo se encuentra el conector Tipo 1 (SAE J1772) que se conecta al vehículo [27].

Las características eléctricas que se utilizan en este nivel son: voltaje monofásico, frecuencia de 50 o 60 Hz, potencia entre 1.3 kW y 3.7 kW y el tiempo de carga puede tardar entre 6 horas (PHEV) y 24 horas (BEV) [28]. Se puede tener una autonomía de 3 a 8 km por cada hora de carga, lo cual depende del tipo de batería y de la capacidad del circuito de la instalación doméstica. El vehículo eléctrico incorpora un cargador AC/DC.



Figura 2.14: Cable portátil para la recarga del VE en Nivel 1.

2.5.2. Recarga semi-rápida – Nivel 2

El nivel 2 de recarga se utiliza en el sector residencial, lugares públicos y de trabajo. El equipo de suministro eléctrico requiere de un circuito eléctrico particular para la instalación del equipo de carga y de un sistema de protección, lo que lo vuelve más seguro y costoso respecto al nivel 1 [27]. Las características eléctricas que se utilizan en este nivel son: voltaje monofásico, bifásico o trifásico, frecuencia de 50 o 60 Hz, potencia hasta 22 kW y el tiempo de carga puede tardar aproximadamente entre 2 horas (PHEV) y 8 horas (BEV) [28]. Se puede tener una autonomía de 16 a 32 km por cada hora de carga. El vehículo eléctrico incorpora un cargador AC/DC, como se observa en la figura 2.15 (a).

El equipo de suministro eléctrico puede ser de dos tipos:

- Equipo portátil mediante el juego de cables, el cual tiene en uno de sus extremos una clavija para la conexión a la red (Nema 14-30, Nema 14-50, etc.) y en el otro extremo se encuentra el conector Tipo 1 (SAE J1772) que se conecta al vehículo, como se observa en la figura 2.15 (b).
- Equipo cargador empotrado en la pared (Wall Box), como el de la figura 2.15 (c).



(a) Esquema de carga [27].

(b) Cable portátil para la recarga del VE [29].

(c) Cargador empotrado en la pared [30].

Figura 2.15: Equipo de suministro eléctrico para el Nivel 2.

2.5.3. Recarga rápida – Nivel 3

El equipo de suministro eléctrico para este nivel de carga requiere de una infraestructura conocida como estación de carga rápida y de conectores diferentes a los utilizados en el nivel 1 y 2, de los cuales destacan: CHAdeMO (conector americano), Tipo 2 / Mennekes, CCS Combo 1 (conector americano), CCS Combo 2 (conector europeo) y GB/T 20234 (conector chino), como se observa en la figura 2.16 (a).

Se utiliza en lugares públicos, donde la inversión económica se justifica por la ubicación estratégica de la estación y el índice de penetración de VE de la región.

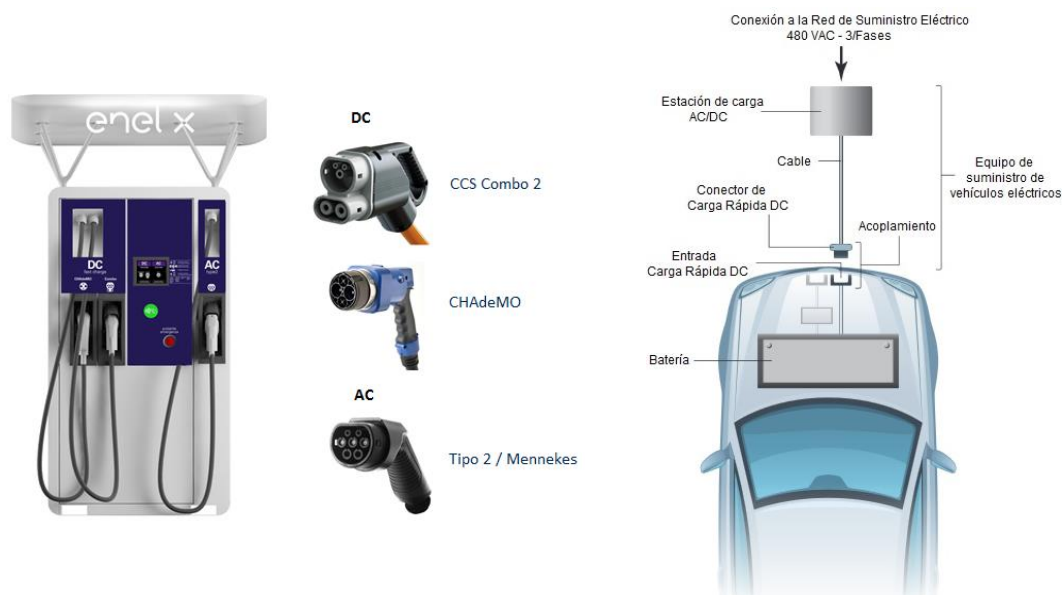
Las características eléctricas que se utilizan en este nivel son:

- **Corriente alterna AC:** voltaje trifásico AC, frecuencia de 60 Hz, potencia de hasta 43.5 kW, y el tiempo de carga aproximado es de 1 hora [3]. El vehículo eléctrico incorpora un cargador AC/DC.
- **Corriente directa DC:** la estación de carga incorpora un cargador AC/DC, por lo que no es necesario utilizar el cargador a bordo del vehículo, como se muestra en la figura 2.16 (b).

Se divide en tres niveles:

- **DC Nivel 1:** voltaje de salida entre 200 y 450 VDC, corriente de hasta 80 A, potencia de hasta 36 kW, el tiempo aproximado de carga está entre 22 minutos (PHEV) y 1.2 horas (BEV) [31].
- **DC Nivel 2:** voltaje de salida entre 200 y 450 VDC, corriente de hasta 200 A, potencia de hasta 90 kW, el tiempo aproximado de carga está entre 10 minutos (PHEV) y 20 minutos (BEV) [31].
- **DC Nivel 3:** voltaje de salida entre 200 y 600 VDC, corriente de hasta 400 A, potencia de hasta 240 kW, el tiempo aproximado de carga es de máximo 10 minutos (BEV) [31].

En la actualidad existen estaciones de carga rápida en DC, con potencias de hasta 350 kW.



(a) Estación de carga rápida para dos VE, 50 kW DC y 22 kW o 43 kW AC [32].

(b) Esquema de carga [27].

Figura 2.16: Equipo de suministro eléctrico para el Nivel 3.

Los tiempos de carga pueden variar dependiendo del tipo de estación de carga, tipo de conector y características de la batería. Los diferentes niveles de carga se deben acoplar a las necesidades y parámetros de consumo del usuario: para viajes de largas distancias en donde el tiempo es fundamental se podría utilizar la carga rápida, mientras que la carga semi-rápida y lenta se podría utilizar

en lugares donde el vehículo permanecerá estacionado por largos periodos de tiempo.

2.6. Tipos de conectores

En el mercado actual de autos eléctricos existen diversos tipos de conectores utilizados para la carga de las baterías. A continuación, se presentan los tipos de conectores más destacados.

Conectores de carga lenta

2.6.1. Schuko

Se trata de un conector convencional doméstico de estándar europeo (CEE 7/4), está formado por dos clavijas cilíndricas simétricas, como se muestra en la figura 2.17. Este conector está diseñado para manejar corrientes máximas de 16 A, y tensiones menores a 250 VAC [33].

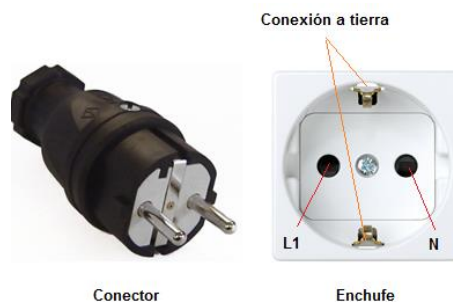


Figura 2.17: Conector Schuko.

2.6.2. Tipo 1 / Yazaki - SAE J1772, IEC 62196-1

Es un estándar de origen japonés adoptado por los mercados norteamericanos y de la Unión Europea para la carga del VE en corriente alterna. Se encuentra formado por cinco pines, como se observa en la figura 2.18: dos pines monofásicos AC, un pin de conexión a tierra y los otros dos pines se usan para detectar la conectividad y comunicarse con el vehículo. Estos conectores están diseñados para manejar tensiones de hasta 250 V, corrientes desde 16 A (carga lenta) hasta 80 A (carga rápida) y potencias de 7.4 kW hasta 19.2 kW [33].

Entre las marcas más destacadas que utilizan este tipo de conectores son: Nissan, Mitsubishi, Renault, Ford, Citroën, Toyota y Kia.

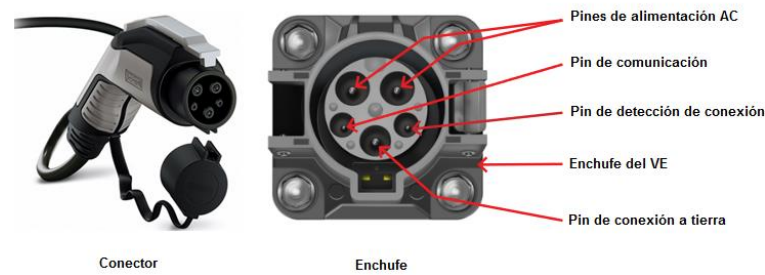


Figura 2.18: Conector SAE J1772.

2.6.3. Tipo 2 / Mennekes - IEC 62196-2

Es un conector de origen alemán, adoptado por el mercado de la Unión Europea. Está formado por siete pines: cuatro pines trifásico AC, un pin de conexión a tierra y dos pines para comunicarse con el vehículo, como se muestra en la figura 2.19. Estos conectores son diseñados para manejar corrientes monofásicas de 16 A y trifásicas de hasta 63 A, voltajes de 100 V a 500 V y potencias de 3.7 kW hasta 43.5 kW [33].

Entre las marcas más destacadas que utilizan este tipo de conectores son: BMW, Audi, Tesla, Porsche, Volvo, Mercedes Benz, Volkswagen y Renault.

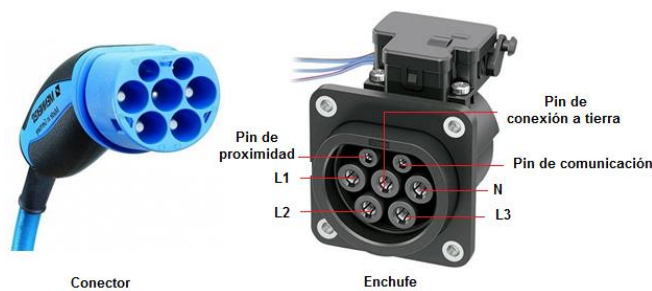


Figura 2.19: Conector Mennekes.

2.6.4. Tipo 3 / Scame

Nació en el 2010 de la alianza “EV Plug Alliance” formada por los fabricantes Scame, Schneider Electric y Legrand. Actualmente se encuentra en desuso debido a que el conector Mennekes se convirtió en el estándar europeo oficial. Este tipo de conector, mostrado en la figura 2.20, presenta dos variantes [34]:

- **3A:** consta de cinco pines: dos pines monofásicos AC, un pin de conexión a tierra y los otros dos pines se usan para detectar la conectividad y comunicarse con el vehículo. Permite cargas monofásicas de hasta 16 A.

- **3C:** consta de siete pines: cuatro pines AC (tres fases y neutro), un pin de conexión a tierra y los otros dos pines se usan para detectar la conectividad y comunicarse con el vehículo. Permite cargas monofásicas y trifásicas de hasta 32 A con una potencia máxima de 22 kW.



Figura 2.20: Conector Scame [35].

Conectores de carga rápida

2.6.5. Sistema de carga combinada CCS

Es un sistema que se basa en estándares abiertos y universales para VE, que integran soluciones de carga en corriente alterna y corriente continua. En el caso de corriente alterna, combina carga monofásica con carga trifásica, en donde la potencia máxima a la que puede trabajar es de 43.5 kW, 63 A en voltaje trifásico [34]. Para la carga en corriente continua, se puede obtener una potencia máxima de 350 kW.

El CCS incluye el conector y entrada (enchufe), así como todas las funciones de control encargadas de realizar la gestión de comunicación entre el vehículo y la infraestructura de recarga.

Este sistema utiliza los conectores Combo 1 y Combo 2, los cuales son extensiones de los conectores tipo 1 (SAE J1772) y tipo 2 (Mennekes), respectivamente, con dos pines adicionales que permiten la carga rápida DC de alta potencia.

Los estándares técnicos más importantes de este sistema son:

Tabla 2.1: Estándares utilizados en el Sistema de Carga Combinada [44].

| Características | DC | AC |
|-----------------------|--|---|
| Conector del vehículo | IEC 62196-3 | IEC 62196-2 |
| Toma del vehículo | IEC 62196-3 | IEC 62196-2 |
| Estación de carga | IEC 61851-23 | IEC 61851-22 |
| Comunicación de carga | Comunicación de alto nivel: ISO / IEC 15118-3 | Señalización básica: IEC 61851-1 |
| | | Comunicación de alto nivel: ISO / IEC 15118-2 ISO / IEC 15118-3 |

Entre las marcas más destacadas que utilizan este tipo de conector son: Jaguar, Volkswagen, Porsche, Audi, Mercedes Benz, Renault, General Motors, BMW, Daimler, Ford, FCA, Tesla (adaptador), Kia y Hyundai.

2.6.5.1. CCS Combo 1

Fue desarrollado para el mercado estadounidense en base a los estándares de la IEC 62196-3 y SAE J1772. Este conector, mostrado en la figura 2.21, es empleado tanto en corriente alterna como corriente continua y está formado por siete pines.

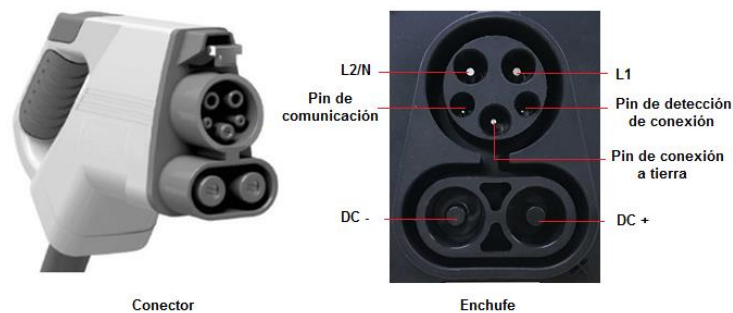


Figura 2.21: Conector Combo 1.

2.6.5.2. CCS Combo 2

Es un conector de carga rápida utilizado en Europa para diversos modos de carga (2, 3 y 4), y empleado tanto en corriente alterna como corriente continua. Está formado por cinco pines, los cuales se muestran en la figura 2.22.

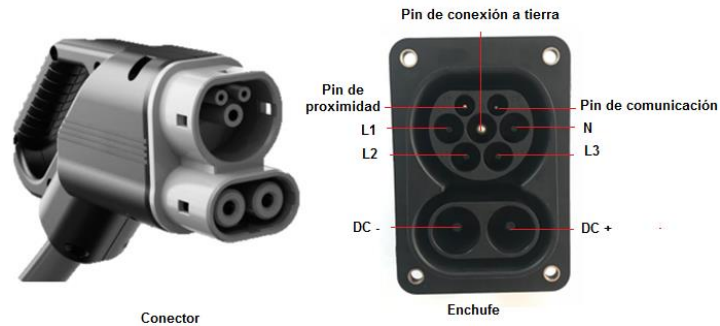


Figura 2.22: Conector Combo 2.

2.6.6. Tipo 4 / CHAdeMO

Se trata de un conector desarrollado por un grupo de empresas japonesas, además es el nombre del protocolo de recarga de baterías para VE y es el acrónimo de "CHArge de MOve" que significa carga para moverse.

Actualmente, el protocolo CHAdeMo 2.0 junto con el conector tipo 4 permiten realizar carga rápida en corriente continua de hasta 400 kW, aplicando un voltaje de hasta 1 kV y una intensidad corriente de 400 A, utilizando cables refrigerados por líquido [36].

Este conector está formado por diez pines: dos pines de potencia, cinco pines de control analógico, dos pines de comunicación y uno no asignado, como se muestra en la figura 2.23 [33].

Entre las marcas más destacadas que utilizan este tipo de conectores son: Jaguar, Citroën, Subaru, Honda, Fiat, Nissan, Mitsubishi, Peugeot, Mazda, Tesla, Toyota, Kia y Hyundai.

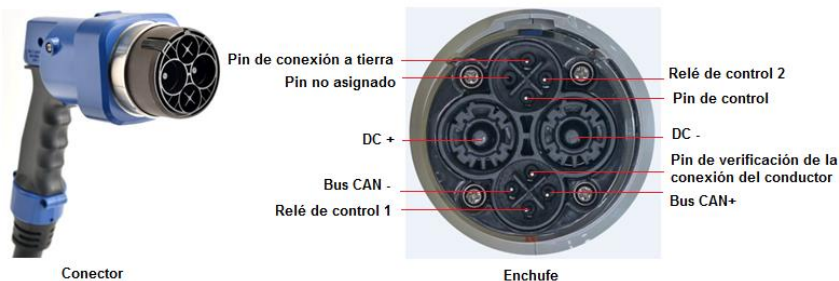


Figura 2.23: Conector CHAdeMO.

La nueva versión del protocolo: CHAdeMO 3.0, se espera que sea lanzada en este año, la cual permitirá alcanzar una potencia de carga de hasta 900 kW. Esta versión se está desarrollando en conjunto con el estándar chino GB/T para alcanzar un objetivo común de compatibilidad entre estos dos estándares de carga rápida [36].

2.6.7. Tesla Supercharger

Es un tipo de conector exclusivo de autos eléctricos marca Tesla, tiene una configuración similar a la del conector tipo 2, como se muestra en la figura 2.24. Permite realizar carga rápida en corriente continua desde 72 kW hasta 250 kW [37].

Tesla Motors también desarrolló un adaptador adicional que permite que el propietario del VE Modelo S / X se recargue en una estación CHAdeMO [38]; sin embargo, Tesla Motors no fabrica ningún tipo de adaptador que permita a los propietarios de automóviles con entradas CHAdeMO o CCS recargarse en una estación Supercharger [39].



Figura 2.24: Conector Tesla Supercharger en Europa y resto del mundo (izquierda) y Norteamérica (derecha) [37].

2.6.8. GB/T 20234

El estándar chino GB/T 20234, conocido como “conjunto de conexión de carga conductiva para vehículos eléctricos”, especifica los requerimientos de estructura, cables, protección, métodos de prueba y especificaciones para el conjunto de conexión de carga conductiva para VE [40].

El estándar chino permite la recarga de las baterías tanto en corriente alterna como en corriente continua.

- **AC: GB/T 20234-2**

El voltaje de corriente alterna nominal no debe superar los 690 V, con una frecuencia de 60 HZ y una corriente nominal máxima de 250 A [40].

Este conector permite realizar la carga del VE en el modo de carga 3 [41].

En la figura 2.25 se muestra el conector GB/T para carga en AC.

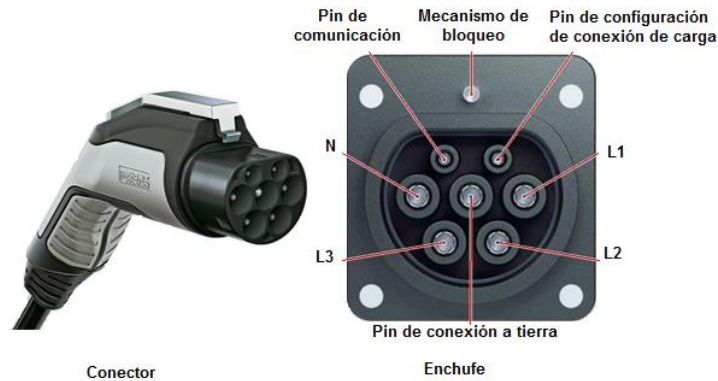


Figura 2.25: Conector GB/T 20234-2.

- **DC: GB/T 20234-3**

El voltaje de corriente continua nominal no debe superar los 1000 V y una corriente nominal máxima de 400 A [40].

Este conector permite realizar la carga del VE en el modo de carga 4 y modo de conexión - caso C [42].

En la figura 2.26 se muestra el conector GB/T 20234 para carga en DC.

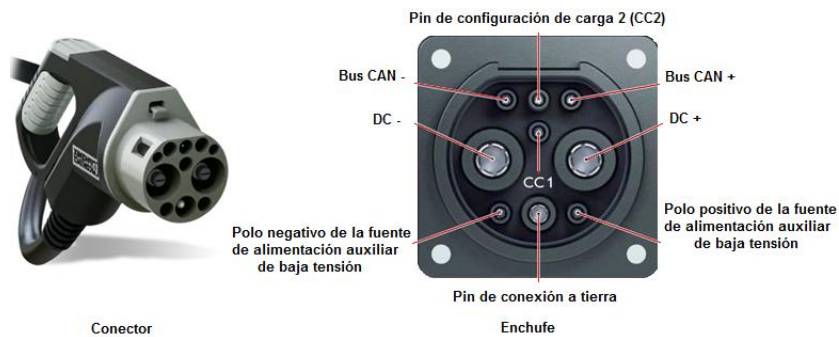


Figura 2.26: Conector GB/T 20234-3.

China actualmente está desarrollando una actualización de su estándar que busca alcanzar una carga de hasta 900 kW para vehículos comerciales más grandes, el cual se espera que sea lanzado este año [43].

2.7. Modos de carga

Los modos de carga se refieren a la técnica de carga que se relacionan con los niveles de comunicación entre el vehículo eléctrico y la infraestructura de recarga [28], así como el grado de control que se puede tener en el proceso de carga, es decir, poder conocer el estado de carga, parar, reanudar la carga o incluso poder inyectar energía eléctrica a la red desde el vehículo (V2G).

Se distinguen cuatro modos de carga con base en la norma IEC 61851 – “Sistema conductivo de carga para vehículos eléctricos”, como se observa en la figura 2.27. Los modos 1 y 2 se utilizan para cargar la batería del VE desde un suministro de red eléctrica a través de un convertidor AC/DC equipado en el interior del vehículo. El modo 3 y 4 utiliza un cargador de batería externo (estación de carga rápida).

2.7.1. Modo 1

Es el tipo de carga más simple, en donde el vehículo eléctrico se conecta a la red de suministro eléctrico doméstico – carga lenta, mediante el conector tipo Schuko o Nema 5-15, en donde el circuito eléctrico no es exclusivo para la carga del VE. Este modo no tiene protección, por lo que es inseguro para la carga del vehículo, pero se suele utilizar para la carga de motos y bicicletas eléctricas [44]. Por otra parte, este modo no requiere de pines de control, es decir, carece de comunicación entre la red eléctrica y el vehículo [28].

El límite máximo de corriente es de 16 A con voltajes menores a 250 V (monofásico) y una potencia máxima de 13.3 kW [28].

2.7.2. Modo 2

El vehículo eléctrico se conecta a la red de suministro eléctrico doméstico – carga lenta, mediante el conector tipo Schuko, en donde el circuito eléctrico es exclusivo para la carga del VE. En este modo el cable incorpora un dispositivo



de comunicación y supervisión de carga, el cual permite verificar si la conexión es correcta [45], además requiere protección de sobrecorriente, protección de falla a tierra y protección diferencial [28].

El límite máximo de corriente es de 32 A con voltajes menores a 250 V (monofásico) o 480 V (trifásico) y una potencia máxima de 26.6 kW [28].

2.7.3. Modo 3

Utiliza un conector especial para la carga del VE y una estación de carga destinada exclusivamente para este fin [44], la cual incorpora un sistema de control superior al del nivel 2 y dispositivos de protección como el interruptor de falla a tierra y protección de sobrecorriente. Permite realizar una carga semi-rápida o rápida dependiendo del tipo de conector específico del vehículo. La conexión se realiza entre el vehículo y la red eléctrica.

El límite máximo de corriente es de 250 A, voltaje trifásico menor a 480 VAC, y una potencia máxima de 184.4 kW [28].

2.7.4. Modo 4

En un modo de carga rápida, en donde el vehículo eléctrico se conecta a la estación de carga rápida que provee corriente continua. Estas estaciones de carga toman la corriente alterna de la red eléctrica y la convierte en corriente continua por medio de un convertidor AC/DC, por lo que el VE no necesitaría utilizar el cargador AC/DC que incorpora el vehículo. Se requiere que este tipo de estaciones tengan un alto grado de comunicación para verificar la conexión entre el VE y la red eléctrica, así como para realizar el control de supervisión de carga. También debe contar con equipos de protección, como: aislamiento galvánico, interruptor de puesta a tierra, protección de sobrecorriente, entre otros [28].

La corriente máxima es de 400 A, voltaje DC entre 200 V y 600 V y una potencia máxima de 240 kW [28]. En la actualidad existen estaciones de carga rápida en DC, con potencias de hasta 350 kW.

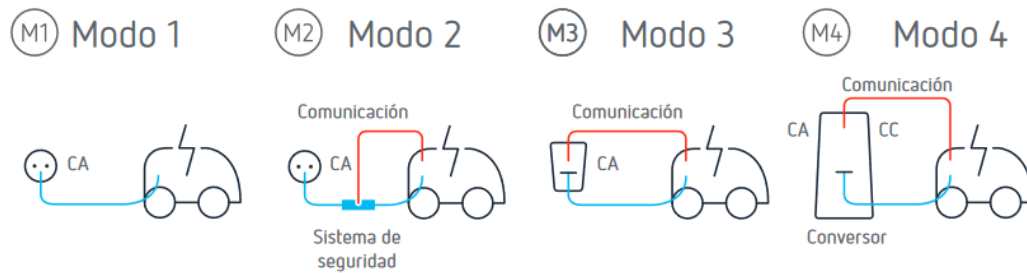


Figura 2.27: Modos de carga [46].

Además, dependiendo del tipo de conexión entre el vehículo y la infraestructura de recarga, se distinguen tres casos:

- **Modo de conexión - caso A:** la conexión entre el VE y la infraestructura de recarga se realiza mediante un conector y cable que está permanentemente unido al vehículo [47], como se muestra en la figura 2.28 (a).
- **Modo de conexión - caso B:** la conexión entre el VE y la infraestructura de recarga se realiza utilizando un cable portátil equipado con enchufe y conector [47], como se muestra en la figura 2.28 (b).
- **Modo de conexión - caso C:** la conexión entre el VE y la infraestructura de recarga se realiza mediante un conector y cable que está permanentemente unido a la estación de carga [47], como se muestra en la figura 2.28 (c).

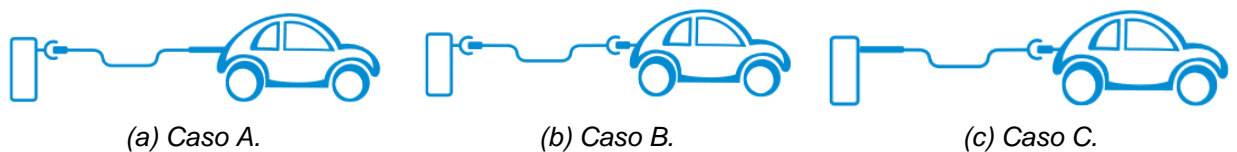


Figura 2.28: Modos de conexión entre el VE y la red de suministro [47].

2.8. Definición e importancia de las estaciones de carga

La estación de carga es la infraestructura compuesta de uno o más puntos de recarga que se encarga de suministrar energía eléctrica, ya sea en corriente alterna o corriente continua a diferentes velocidades (lenta, semi-rápida, rápida), a los vehículos eléctricos enchufables.

A diferencia de las estaciones de servicio de combustible, las cuales se encuentran en lugares privados distribuidos a lo largo de la red vial, las

estaciones de carga de los vehículos eléctricos pueden estar instalados en lugares públicos y privados, como pueden ser centros comerciales, lugares de trabajo, parques, parqueaderos públicos y el hogar.

Con la planificación e instalación correcta de infraestructuras para la carga de vehículos eléctricos en lugares estratégicos de la vía, el usuario elimina su “ansiedad de autonomía” por quedarse sin energía durante un viaje y aumenta la confianza sobre el uso y compra de estos vehículos.

2.9. Ventajas y desventajas del uso de vehículos eléctricos frente a los autos de combustión interna

Tabla 2.2: Ventajas y desventajas de los VE frente a los vehículos de MCI.

| Ventajas | Desventajas |
|--|---|
| La energía almacenada en las baterías es extraída de la red eléctrica a partir de cualquier fuente energética, incluida las energías renovables. | Autonomía limitada en comparación a los vehículos de combustión interna, debido a la capacidad de almacenamiento de las baterías y peso de las mismas. |
| No produce emisiones contaminantes. | Falta de infraestructura de carga e inadecuada ubicación. |
| La contaminación acústica es mínima. | Mayor tiempo de recarga, entre 30 min a 24 horas, dependiendo del tipo de recarga en comparación con los 5 minutos que toma cargar el tanque de gasolina de un auto convencional. |
| Son más eficientes que los vehículos que usan combustibles fósiles. | Costo elevado de los vehículos eléctricos debido a impuestos de importación y tipos de tecnología. |
| Incorporan un sistema de frenado regenerativo el cual consigue cargar las baterías al frenar. | La cantidad de centros de mantenimiento con personal calificado para asistir a los VE aun es baja. |
| Necesitan un menor mantenimiento en comparación con los vehículos convencionales. | Falta de políticas públicas y privadas orientadas a fomentar e incentivar el uso de vehículos eléctricos. |
| Impulsan el desarrollo de nuevas tecnologías para mejorar las prestaciones. | Complejidad en el reciclaje de las baterías. |
| Supone oportunidades de negocio y genera nuevos campos laborales. | Rechazo social debido al desconocimiento sobre el funcionamiento y las ventajas asociadas al vehículo eléctrico. |

2.10. Situación internacional sobre los vehículos eléctricos

Tabla 2.3: Políticas relacionadas con VE en las principales potencias del mundo [3].

| | | Canadá | China | Unión Europea | India | Japón | Estados Unidos |
|--------------------------------|-------------------------------------|--------|-------|---------------|-------|-------|----------------|
| Regulaciones de vehículos | Mandatos ZEV | ✓* | ✓ | | | | ✓* |
| | Estándares de ahorro de combustible | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Incentivos de vehículos | Incentivos fiscales | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |
| Objetivos para promover los VE | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓* |
| Políticas industriales | Subsidios | ✓ | ✓ | | | ✓ | |
| Regulaciones de cargadores | Estándares de hardware** | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| | Regulaciones de construcción | ✓* | ✓* | ✓ | ✓ | | ✓* |
| Incentivos para cargadores | Incentivos fiscales | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓* |

* Indica que las políticas solo se han implementado en nivel estatal/provincial/local.

** Las normas para cargadores son un requisito previo fundamental para el desarrollo de equipos de suministro de vehículos eléctricos. Todas las regiones indicadas en la tabla han desarrollado estándares para cargadores. China, Unión Europea y la India están exigiendo normas específicas como requisito mínimo; Canadá, Japón, Estados Unidos no lo están.

✓ Indica que la política se establece a nivel nacional. Las regulaciones de construcción se refieren a la obligación de instalar cargadores o conductos para facilitar su instalación futura en edificios nuevos y renovados. Los incentivos para cargadores incluyen la inversión directa y los incentivos de compra para los cargadores públicos y privados.

2.11. Situación y normativa nacional sobre los vehículos eléctricos

En el Ecuador, no existe ninguna normativa técnica nacional que indique los estándares, protocolos y características que deben cumplir los componentes e infraestructura para la recarga de los vehículos eléctricos, por lo que se han adoptado normativas internacionales en base al criterio del instalador, según el tipo de tecnología vehicular que se importa, de acuerdo a factores ambientales, sociales y económicos que atraviesa el país.

El Gobierno ha implementado una serie de políticas que buscan promover la compra y el uso de los vehículos eléctricos, como son:



- Resolución No. 016-2019, aprobada por el Pleno del Comité de Comercio Exterior (COMEX), en la cual se eliminan los impuestos arancelarios a la importación de vehículos eléctricos, baterías, estaciones de carga y cargadores, para cualquier precio en el lugar de origen (FOB) [48].
- El Impuesto a Consumos Especiales (ICE) que aplica a todo vehículo importado es de 0 % para vehículos eléctricos o híbridos, siempre y cuando el precio final del vehículo sea menor a \$35000 [49].
- El Impuesto de Valor Agregado (IVA) es del 0 % para vehículos eléctricos de uso particular, transporte público y de carga [49].
- La Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) creó una tarifa diferenciada para la energía eléctrica que se destine a la carga del auto mediante el Pliego Tarifario para las Empresas Eléctricas de Distribución, en donde se indica la tarifa general de bajo voltaje para estaciones de carga lenta y la tarifa general de medio y alto voltaje para estaciones de carga rápida [50].
- La Ley Orgánica de Eficiencia Energética, en su artículo 14, menciona que para el 2025 todos los servicios de transporte público en el Ecuador continental deberán ser de medio motriz eléctrico [51].
- El Proyecto de Ley de Fomento a la Movilidad Sostenible y Desarrollo de la Electromovilidad [52] destaca los siguientes aspectos:
 - Fomentar la movilidad eléctrica a través de mecanismos y planes promocionales para el reemplazo y/o eliminación de vehículos convencionales.
 - Medidas de incentivos económicos a aquellas personas que desarrollen o ejecuten programas, planes, acciones, actividades vinculadas con la movilidad sostenible.



- Promover la industria nacional mediante programas de apoyo para el desarrollo de prototipos de vehículos, cargadores, componentes y sistemas asociados a la electromovilidad.
- Creación de una etiqueta de VE obligatoria para poner a la venta un vehículo nuevo, la cual incluye parámetros como: autonomía, eficiencia energética, vida útil de la batería, emisiones de dióxido de carbono evitadas, entre otros.
- Creación de la Agencia Nacional de Movilidad Sostenible (ANMS), que será el ente encargado de la regulación, planificación y control de la movilidad sostenible y electromovilidad.



Capítulo 3. Estudio del modelo matemático del consumo energético de un vehículo eléctrico

3.1. Introducción

Hoy en día, el sector del transporte se encuentra experimentando un crecimiento en la demanda de vehículos eléctricos, ya que son una opción viable para brindar seguridad energética, reducir la contaminación ambiental y el consumo de combustibles fósiles; sin embargo, la popularización de estos se ha visto obstaculizada por la autonomía del vehículo, la cual se encuentra relacionada con el avance tecnológico de las baterías, así como por los tiempos de recarga y limitadas estaciones de carga debido a su alto costo de adquisición y desconocimiento de la tecnología por parte de la población.

Existen varias formas de superar esta problemática, entre las cuales destacan: mejorar la capacidad de las baterías, aplicar sistemas de frenado regenerativo, analizar el consumo de energía del VE para determinar la localización de las estaciones de carga, y estudiar el comportamiento de conducción en una ruta para establecer el modo de conducción más eficiente, el cual permita extender la autonomía del vehículo.

Actualmente, el consumo de energía de los VE y su autonomía se evalúa por parte de los fabricantes a partir de dos consideraciones: un modelo físico de la dinámica del vehículo, y ciclos de conducción estandarizados que son una serie de puntos de datos que registran la velocidad de un vehículo a lo largo del tiempo durante el viaje que realice el mismo, los cuales representan los patrones de uso del vehículo y determinan las tasas de carga y descarga de las baterías; sin embargo, estos ciclos estandarizados no representan fielmente un ciclo de conducción real, puesto que el modo de conducción se ve afectado por diversos factores variables y a la vez fuertemente relacionados entre sí, como: estilo de conducción, tráfico, condiciones climáticas, atributos de la ruta (por ejemplo: tipo de ruta, estado de la ruta), eficiencias de los diferentes sistemas del vehículo, entre otros. Esto se evidencia en el estudio “Discrepancies between type-approval and real-world fuel-consumption and CO2 values” realizado en Europa, en donde se muestra que las predicciones del consumo de energía para ciclos



de conducción estandarizados en Europa son 21 % más bajas que para un ciclo de conducción real [53]. Otro estudio desarrollado en St.Louis, Missouri, llamado “Using Global Positioning System Travel Data to Assess Real-World Energy Use of Plug-In Hybrid Electric Vehicles”, utiliza un conjunto de datos GPS de 227 vehículos para estimar el consumo de energía de PHEV mediante el software ADVISOR. En el estudio se compara el rendimiento de los vehículos en el ciclo de conducción estándar de EE.UU. y ciclo de conducción real, en donde se concluye que los vehículos de gasolina tienden a consumir más energía en un ciclo de conducción real, mientras que los PHEV consumen menos energía en un ciclo de conducción real que en un ciclo estandarizado [54].

Debido a estos antecedentes, es importante desarrollar un modelo que permita estimar el consumo energético que tendría un VE en base a un ciclo de conducción real, para de esta forma mejorar las predicciones del consumo de energía de un VE.

Es así que en este capítulo se presenta la teoría acerca de los tipos de modelos matemáticos que permiten calcular el consumo de energía de un VE, se selecciona el modelo matemático “cuasi-estacionario hacia atrás” y se desarrolla su formulación.

3.2. Dinámica del vehículo

El comportamiento dinámico del vehículo describe como se mueve éste en la superficie de una carretera debido a las fuerzas aplicadas sobre el mismo [55]. “Si se considera al vehículo como un sólido rígido, estas fuerzas provendrán del contacto entre el neumático y la carretera, la atmósfera (la aerodinámica) y la gravedad” [56].

La fuerza que ejerce la carretera sobre el neumático depende de diversos factores como: presión, dimensiones y material del neumático, así como del material y estado de la carretera, entre otros [56].

El estudio de la dinámica vehicular puede ser empírico o analítico. El método empírico se fundamenta en la técnica exploratoria de ensayo y error, la cual

“permite identificar los factores que afectan a las características dinámicas, de qué modo y bajo qué condiciones” [56]. Este método puede conducir a falsas creencias, en donde no se puede diferenciar entre conclusiones correctas y conclusiones erróneas si no se tiene un conocimiento previo de las leyes de la mecánica y de cómo los cambios en las propiedades o diseños del vehículo afectan a sus características [56].

Por otra parte, el método analítico describe el comportamiento mecánico del vehículo fundamentándose en las leyes de la Física Mecánica y modelos matemáticos que son representados mediante ecuaciones algebraicas o diferenciales, las cuales relacionan fuerzas o movimientos con las propiedades de los diferentes componentes que conforman un vehículo [56]. El modelo matemático permite ponderar e identificar los diversos factores que influyen en los resultados de un estudio, con la finalidad de calibrar el mismo para determinar un modelo preciso y obtener mayores beneficios del vehículo. Sin embargo, se debe tener presente que “los modelos analíticos no están exentos de errores, por lo que los resultados deben interpretarse como una aproximación precisa de la realidad” [56].

3.3. Modelos de consumo energético

Los modelos de consumo energético del vehículo eléctrico se pueden dividir en dos categorías, basados en la dirección del cálculo:

- 1) **Modelos hacia atrás:** son aquellos en los que se calcula el esfuerzo de tracción requerido en las ruedas para empujar el VE, en función del ciclo de conducción (posición, velocidad, aceleración, grado de inclinación, tiempo, etc.) y características de los vehículos (dimensiones, peso, eficiencias de los sistemas, etc.). A partir de este esfuerzo se puede ir “hacia atrás” para calcular la energía entregada y absorbida por la batería de alto voltaje [11]. Estos modelos se caracterizan por tener tiempos de simulación más rápidos respecto a los modelos hacia adelante y su fácil implementación en entornos de simulación más complejos [57].



2) Modelos hacia delante: son aquellos en los cuales los cálculos comienzan desde el motor. Estos modelos permiten realizar una simulación más realista del consumo energético, por lo que son utilizados en la industria automotriz para identificar las interacciones de cada componente que afectan el consumo energético del vehículo. Sin embargo, estos modelos se caracterizan por tener tiempos de simulación lentos y equipos sofisticados de medición, lo cual aumenta la precisión de los cálculos [57] [11].

Dependiendo del grado de precisión que se necesite para cada variable o componente del vehículo, el modelo de consumo de energía puede ser: de estado estacionario, cuasi-estacionario y dinámico [57]. La principal ventaja de emplear un modelo estacionario o cuasi-estacionario es la rapidez de los tiempos de cálculos, mientras que la desventaja que presentan es la posible imprecisión para la simulación dinámica, además los “modelos hacia atrás” también son llamados “modelos cuasi-estacionarios” debido a que entregan limitada información de ciertas variables medibles, como la posición del pedal del acelerador y del freno, limitando de esta forma su precisión en el cálculo [57].

Por otra parte, el modelo dinámico permite obtener una alta precisión para las simulaciones dinámicas en diferentes escalas de tiempo, pero sus tiempos de simulación son lentos debido a que este modelo contiene ecuaciones diferenciales que describen el estado del sistema, lo que lo diferencia de los modelos estacionarios y cuasi-estacionarios, como resultado de esto los “modelos hacia adelante” también son llamados “modelos dinámicos” [11].

En base a lo anterior, la elección del modelo matemático dependerá de la precisión que se quiere obtener en la simulación, elección que estará influenciada por la cantidad de información a la que se tenga acceso sobre las variables y constantes del modelo, así como de los equipos de medición que se disponga para el estudio.

Por lo tanto, en este trabajo se emplea el modelo matemático “cuasi-estacionario hacia atrás” debido a los rápidos tiempos de simulación, y ya que permite una alta flexibilidad para simular gran cantidad de ciclos de conducción.

3.4. Desarrollo del modelo matemático

Un VE es un sistema complejo que posee diferentes subsistemas como: mecánico, eléctrico, de control, magnético, neumático, electromecánico e hidráulico, por lo que puede modelarse con varios niveles de detalle dependiendo de los fenómenos principales que se estudien. En este trabajo solo se emplean los subsistemas que proveen tracción mecánica y eléctrica al vehículo [58].

El primer paso para modelar el consumo energético del vehículo es obtener una ecuación para el “esfuerzo de tracción”, que es la fuerza necesaria para proporcionar tracción mecánica para impulsar el vehículo hacia adelante, llamada fuerza de propulsión [59].

Para esto se debe considerar la masa del vehículo m [kg], agrupada en el centro de gravedad, que avanza a una velocidad v [m/s], con una dirección longitudinal hacia arriba en una pendiente de ángulo α [rad], como se muestra en la figura 3.1.

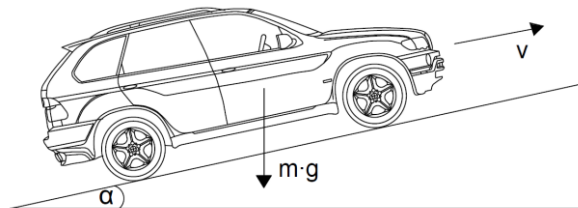


Figura 3.1: Diagrama de vectores que intervienen en el plano inclinado del VE [60].

Según la segunda ley de la mecánica de Newton, el movimiento dinámico de un vehículo en un eje de coordenadas está determinado por la suma de todas las fuerzas que actúan sobre él en el mismo eje de dirección, como se muestra a la ecuación (3.1).

$$m \cdot a = m \cdot \frac{dv(t)}{dt} = F_{tracción}(t) - F_{resistiva}(t) \quad (3.1)$$

Donde m [kg] es la masa equivalente a acelerar, a [m/s^2] = $\frac{dv(t)}{dt}$ es la aceleración o tasa de variación de la velocidad del vehículo $v(t)$ [m/s] respecto al tiempo, $F_{tracción}(t)$ [N] es la suma de todas las fuerzas de tracción que actúan para aumentar la velocidad del vehículo y $F_{resistiva}(t)$ [N] es la suma de todas las fuerzas resistivas que se oponen al movimiento del vehículo.

La fuerza de tracción principal es la ejercida desde el tren motriz a través del engranaje, el diferencial y el eje de la rueda hasta el área de contacto entre las ruedas y la carretera.

La fuerza de tracción debe superar la resistencia a la rodadura, resistencia aerodinámica, fuerza de pendiente, fuerza para acelerar el vehículo y la fuerza para proporcionar aceleración angular al motor de tracción. Por lo tanto, la ecuación (3.1) se puede expresar como:

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{la} + F_{wa} \quad (3.2)$$

Donde F_{te} [N] es la fuerza de tracción, F_{rr} es la fuerza de resistencia a la rodadura, F_{ad} es la fuerza de arrastre aerodinámico, F_{hc} es la fuerza de pendiente, F_{la} es la fuerza requerida para producir una aceleración lineal y F_{wa} es la fuerza requerida para proporcionar una aceleración rotacional al motor de tracción. Estas fuerzas se pueden observar en la figura 3.2.

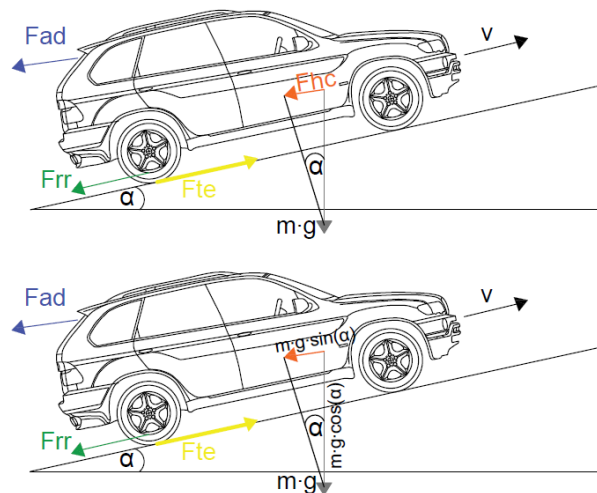


Figura 3.2: Diagrama de fuerzas que actúan sobre un vehículo [59].

3.4.1. Fuerza de resistencia a la rodadura

La resistencia a la rodadura es la fuerza que se opone al movimiento del vehículo en el eje de dirección de desplazamiento cuando éste rueda sobre una superficie a través de los neumáticos cargados [61].

La resistencia a la rodadura en superficies duras se debe principalmente a las pérdidas por histéresis en los neumáticos del vehículo [11]. La histéresis se produce cuando el neumático gira sobre la superficie de una pista, lo cual genera una distribución asimétrica de las fuerzas de reacción del suelo (N), debido a que entre la rueda y la superficie no hay un punto, sino un área de contacto y una deformación, ya que el neumático está fabricado por un material elasto-plástico, es decir deformable bajo carga y en operación [62].

Cuando un neumático gira, la banda de rodamiento se deforma y como resultado de esta distorsión la presión en la mitad delantera del área de contacto es mayor que la mitad posterior, lo que da como resultado que la fuerza de reacción del suelo se desplace hacia adelante una distancia Δx del eje de la rueda [11], como se muestra en la figura 3.3 (a).

En superficies blandas, la resistencia a la rodadura se debe principalmente a la deformación de la superficie del suelo, como se muestra en la figura 3.3 (b). La fuerza de reacción del suelo se desplaza casi por completo a la mitad delantera del área de contacto [11].

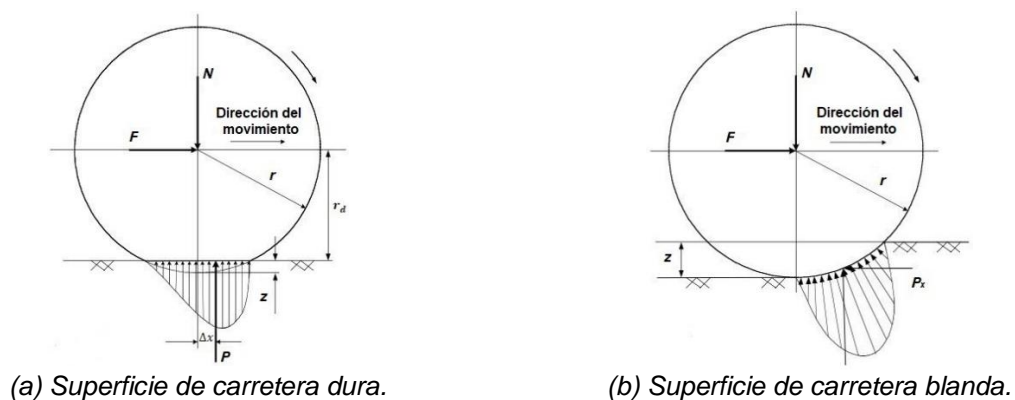


Figura 3.3: Desviación del neumático y resistencia a la rodadura [11].

La fuerza de reacción del suelo desplazada hacia adelante induce un torque alrededor del eje de rotación que se opone al giro, y por lo tanto al desplazamiento del vehículo [11]. Esto se denomina momento de resistencia a la rodadura y se expresa como:

$$T_r = N \cdot \Delta x = m \cdot g \cdot \Delta x \quad (3.3)$$

Para mantener el neumático rodando se requiere una fuerza F que actúa sobre el centro del neumático para equilibrar el momento de resistencia a la rodadura [11]. Esta fuerza se denomina fuerza de resistencia a la rodadura F_{rr} y se expresa como:

$$T_r = N \cdot \Delta x = F_{rr} \cdot r_d \rightarrow F_{rr} = \frac{T_r}{r_d} = \frac{N \cdot \Delta x}{r_d} = N \cdot f_{rr} \quad (3.4)$$

Donde r_d es el radio efectivo del neumático y $f_{rr} = \Delta x/r_d$ es el coeficiente adimensional de resistencia a la rodadura.

Existen diversas ecuaciones empíricas que modelan matemáticamente el coeficiente f_{rr} en función de diversos factores, como: material, estructura, presión, geometría de la banda de rodadura y temperatura del neumático, así como las condiciones sobre las que opera, como la velocidad, tipo y estado de la calzada, condiciones climatológicas (seco, mojado), entre otros [11] [62].

Adicionalmente, cuando un vehículo se desplaza sobre una trayectoria con una pendiente α , la carga normal N se reemplaza por su componente perpendicular a la superficie de la trayectoria [11], por lo tanto, la fuerza de resistencia de la rodadura queda expresada como:

$$F_{rr} = m \cdot g \cdot f_{rr} \cdot \cos(\alpha) \quad (3.5)$$

3.4.1.1. Factores que afectan al coeficiente de resistencia a la rodadura

- Histéresis

Los neumáticos presentan múltiples ventajas, entre las que más destacan están: la capacidad de proporcionar una mayor amortiguación para mayor comodidad, y el agarre, producto de la deformación bajo carga al entrar en contacto con la superficie de la carretera; sin embargo, presentan la desventaja

de perder y gastar energía a medida que el neumático se deforma y se recupera cíclicamente durante su rotación bajo el peso del vehículo [61]. Esta pérdida de energía proviene mayoritariamente del comportamiento visco-elástico de los materiales del caucho, en donde parte de la energía almacenada se recupera al retirar la carga (característica propia de los materiales elásticos), mientras que el resto de energía se convierte en calor, exhibiendo un comportamiento propio de los materiales viscosos. Este comportamiento, en el que la pérdida de energía mecánica está asociada a cada ciclo de deformación y recuperación se conoce como histéresis [61], el cual se puede observar en la figura 3.4.

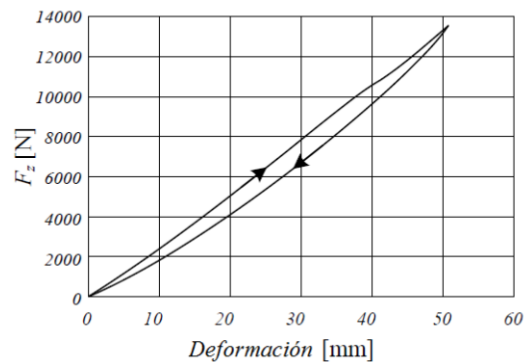


Figura 3.4: Efecto de histéresis en la carga y descarga de un neumático [62].

- Temperatura del neumático

La temperatura del neumático se ve influenciada por condiciones ambientales, material y diseño del neumático, velocidad del vehículo y tiempo de funcionamiento.

Cuando un neumático rueda por una carretera desde una condición fría, la temperatura aumenta gradualmente [63] y la energía disipada por el caucho sometido a las repetidas deformaciones disminuye moderadamente, debido a que el efecto de la resistencia a la rodadura también disminuye (comportamiento propio de los materiales visco-elásticos) [61].

- Presión de los neumáticos

En la mayor parte del tiempo, “la presión del neumático determina la elasticidad del mismo y, en combinación con la carga, determinan la deflexión en las paredes laterales y la región de contacto sobre la superficie” [63]. De igual

manera, la resistencia a la rodadura también está influenciada por la elasticidad del suelo (superficies blandas o duras).

La resistencia a la rodadura disminuye con el incremento de la presión del neumático, debido a que este mantiene más firmemente su forma, por lo que la deformación del caucho será menor en comparación con la de un neumático a baja presión. Es así que las pérdidas por histéresis se reducen, disminuyendo la resistencia a la rodadura [61].

Para prevenir la deformación excesiva y la histéresis, es necesaria una correcta presión de los neumáticos [61]. En la figura 3.5 se muestra como se ve un neumático con una presión adecuada.



Figura 3.5: Efectos de la presión en el neumático sobre la adherencia [64].

- Velocidad

Los neumáticos operados a altas velocidades, las cuales se asocian a un estilo de conducción en carretera, presentan un incremento en la resistencia a la rodadura debido a las “ondas” que se producen en la parte trasera de la cubierta que gira [62], conforme aumenta la frecuencia de deformación de los neumáticos, como se observa en la figura 3.6.

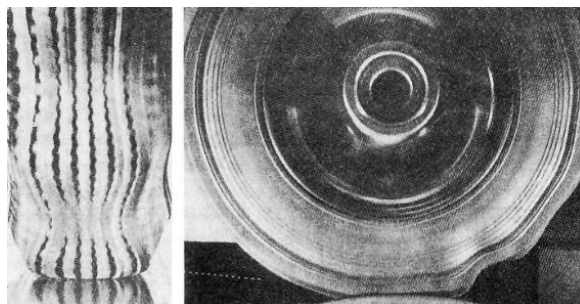


Figura 3.6: Ondas producidas en un neumático a alta velocidad [62].



Sin embargo, a medida que aumenta la velocidad con el paso del tiempo y del recorrido, la temperatura interna del neumático aumenta y de esta forma se compensa una parte de la resistencia a la rodadura. El efecto total es que la velocidad de operación de los neumáticos tiene una mínima influencia en la resistencia a la rodadura en comparación con otros factores ya presentados [61].

La influencia de la velocidad se vuelve relevante cuando la velocidad se combina con una presión del neumático más baja [63].

- **Material y diseño del neumático**

El material y grosor de las paredes laterales del neumático y la banda de rodadura determinan la rigidez y la pérdida de energía en el neumático [63].

Los neumáticos gastados y lisos muestran valores de coeficiente de resistencia a la rodadura de hasta 20 % más bajos que los neumáticos nuevos [63].

- **Superficie de la carretera**

Las superficies irregulares de la carretera contribuyen en la pérdida de energía de rodadura al agudizar la deformación de los neumáticos. Este efecto puede aumentar las pérdidas de energía entre un 5 y 20 % [65].

El material de la carretera también contribuye a la resistencia a la rodadura al deformarse o desviarse bajo el peso de la carga del vehículo. La cantidad de energía perdida dependerá de la rigidez de la superficie, ya que por ejemplo las carreteras de tierra o grava tienden a deformarse y a presentar una resistencia a la rodadura del doble que las superficies pavimentadas de consistencia más dura [66].

3.4.2. Fuerza de arrastre aerodinámico

Un vehículo que se desplaza a una velocidad v , se ve expuesto inevitablemente a una fuerza de resistencia aerodinámica que se opone al movimiento del vehículo debido al arrastre aerodinámico, producto del flujo de

aire alrededor y a través del vehículo, que a menudo se los conoce como flujos internos y externos [11]. El flujo externo es el más dominante ya que representa más del 90 % de la resistencia aerodinámica total de un vehículo de pasajeros y está formado por dos componentes [67]:

1) Arrastre de presión: también conocido como arrastre de forma, surge debido al tamaño y forma del vehículo, y se produce cuando el vehículo se desplaza hacia adelante y perturba el aire que fluye a su alrededor, forzando al aire a separarse de la superficie del objeto generando dos zonas de presión: la primera zona de alta presión (frente del vehículo) que se opone al movimiento de propulsión del vehículo, y la segunda zona de baja presión (parte posterior del vehículo) que tira de él hacia atrás [11], como se muestra en la figura 3.7.

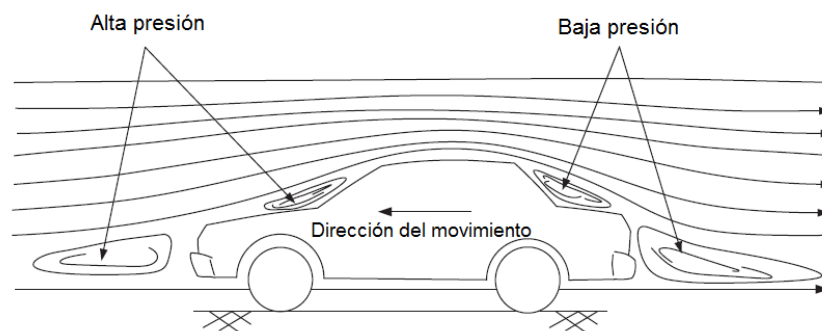


Figura 3.7: Arrastre de presión [11].

2) Fricción de piel: es el roce aerodinámico entre un objeto sólido y fluido (líquido o gas) por el que se mueve, causado por un arrastre viscoso del fluido en la capa límite alrededor del vehículo [68]. Esta componente depende de las propiedades del fluido (viscosidad) y de la superficie del objeto (rugosidad).

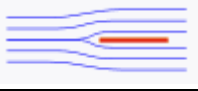
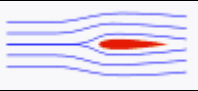

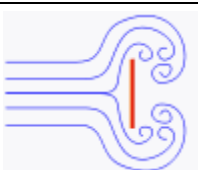
A partir de estos dos componentes se define el coeficiente adimensional de arrastre aerodinámico C_d :

$$C_d = C_{d,fricción} + C_{d,forma} \quad (3.6)$$

De los dos componentes, el arrastre de forma constituye más del 90 % de la resistencia aerodinámica externa total de un automóvil de pasajeros; sin

embargo, la fricción de piel se vuelve de valores significativos para vehículos largos [67]. Esto se ilustra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Componentes del arrastre aerodinámico [69].

| Forma y flujo | Arrastre de forma | Fricción de piel |
|---|-------------------|------------------|
|  | 0 % | 100 % |
|  | ~10 % | ~90 % |
|  | ~90 % | ~10 % |
|  | 100 % | 0 % |

Debido a la complejidad de las formas, tamaños de los vehículos, y de la naturaleza compleja del comportamiento de los fluidos dinámicos (aire), la precisión y confiabilidad para desarrollar modelos matemáticos aumenta; sin embargo, en la parte práctica la fuerza de arrastre aerodinámico F_{ad} se expresa mediante la ecuación (3.7).

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_d \cdot A_f \cdot v^2 \quad (3.7)$$

Donde ρ_a [kg/m^3] es la densidad del aire, C_d es el coeficiente de arrastre aerodinámico, A_f [m^2] es el área seccional del vehículo y v es la velocidad del vehículo.

3.4.3. Fuerza de la pendiente

La fuerza de la pendiente se produce cuando existe un trayecto que presenta una pendiente, ya que cuando el vehículo sube o baja por la pendiente su peso produce una componente que se opone al movimiento hacia adelante (pendiente ascendente) actuando como una fuerza resistiva (+) o contribuye al movimiento hacia adelante (pendiente descendente) actuando como una fuerza de tracción (-) [11]. Por lo tanto, la dinámica del vehículo se ve afectada por la componente

de fuerza gravitacional paralela a la vía (ver figura 3.2), que se describe mediante la ecuación (3.8).

$$F_{hc} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (3.8)$$

Donde m [kg] es la masa total del vehículo, g [m/s^2] es la gravedad y α [rad] es el ángulo de la pendiente de la vía.

Desde el punto de vista energético, un vehículo que se desplaza cuesta arriba experimentará un mayor consumo de energía en comparación con un vehículo que se desplaza cuesta abajo y que posee un sistema de frenado regenerativo, el cual permite cargar la batería de alto voltaje del vehículo.

3.4.4. Fuerza de aceleración lineal

Esta fuerza se basa en la segunda ley de Newton, en donde se postula que “para un cuerpo dado, la magnitud de la aceleración es directamente proporcional a la magnitud de la fuerza neta que actúa sobre él” [70], y se encuentra definida por la ecuación (3.9).

$$F_{la} = m \cdot a \quad (3.9)$$

Donde m [kg] es la masa total del vehículo y a [m/s^2] es la aceleración lineal. La dirección de aceleración es la misma que la dirección de la fuerza neta.

Esta fuerza proporciona una aceleración lineal cuando existe un cambio de velocidad en el vehículo. La dirección del vector de aceleración es la misma que la dirección que la fuerza neta [70].

3.4.5. Fuerza de aceleración angular

Es la fuerza requerida para proporcionar una aceleración rotacional al motor de tracción [58], y se expresa como:

$$F_{wa} = I \cdot \frac{G^2}{n_g \cdot r^2} \cdot a \quad (3.10)$$

Donde I [$kg \cdot m^2$] es el momento de inercia del rotor del motor, G [adimensional] es la relación de transmisión o engranaje del sistema que

conecta el motor al eje, n_g [%] es la eficiencia del sistema de engranajes y r [m] es el radio del neumático.

Con frecuencia, los fabricantes de vehículos no incluyen en sus catálogos los valores de momento de inercia I , por lo que en el libro “Electric Vehicle Technology Explained” [59] se realiza una demostración matemática en la que se sugiere que una aproximación razonable para reemplazar esta fuerza es aumentar en un 5 % la masa total del vehículo en la fuerza de aceleración lineal, por lo que tomando en consideración esta sugerencia, la ecuación (3.9) queda expresada como:

$$\mathbf{F}_{la} = \gamma \cdot m \cdot \mathbf{a} \quad (3.11)$$

Donde γ es el factor de masa de 5 %, que convierte de manera equivalente las inercias rotacionales de los componentes giratorios en masa traslacional.

Es así que se deberá omitir la fuerza \mathbf{F}_{wa} en la ecuación (3.2), siempre y cuando se considere el factor de masa antes mencionado [59].

Por lo tanto, la ecuación final de la fuerza de tracción \mathbf{F}_{te} queda expresada como:

$$\mathbf{F}_{te} = \mathbf{F}_{rr} + \mathbf{F}_{ad} + \mathbf{F}_{hc} + \mathbf{F}_{la} \quad (3.12)$$

3.4.6. Potencia

La potencia se puede definir como la rapidez con la que se realiza un trabajo ΔT en un intervalo de tiempo Δt , y al igual que el trabajo y la energía, la potencia es una cantidad escalar, cuya unidad definida por el Sistema Internacional (SI) es el vatio [W].

$$P_{media} = \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (3.13)$$

Debido a la variabilidad de eventos que existen en una ruta de manejo, la rapidez con la que el motor eléctrico efectúa el trabajo de impulsar al vehículo puede que no sea constante, es por esto que se define la potencia instantánea como el valor límite de la potencia media cuando Δt tiende a cero.

En adición a esto, dentro de la Física Mecánica, la potencia se puede expresar en términos de fuerza y velocidad debido a que el trabajo está definido como el producto escalar del vector de fuerza \vec{F} por el vector de desplazamiento \vec{s} , por lo tanto, la potencia instantánea queda definida como:

$$P(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} F \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t} = F \cdot v(t) \quad (3.14)$$

Finalmente, la potencia en las ruedas del vehículo $P_{te}(t)$ se calcula del resultado de la fuerza de tracción, como se muestra en la ecuación (3.15).

$$P_{te}(t) = (\mathbf{F}_{rr} + \mathbf{F}_{ad} + \mathbf{F}_{hc} + \mathbf{F}_{la} + \mathbf{F}_{wa}) \cdot \mathbf{v} = \mathbf{F}_{te} \cdot \mathbf{v}(t) \quad (3.15)$$

El valor de P_{te} será positivo cuando la energía almacenada en la batería de alto voltaje se está descargando o es consumida para impulsar el vehículo P_{out}^{bat} , mientras que será negativo cuando la batería se carga P_{in}^{bat} . Es importante mencionar que la batería tiene una máxima potencia de carga $P_{c,max}^{bat}$ y que durante la carga por frenado regenerativo pueden existir grandes picos de potencia que superen el valor nominal de las baterías pero que son tolerables durante un corto instante de tiempo [71]. En adición a esto, la cantidad de energía cinética que se puede recuperar por el sistema de frenado regenerativo está limitada por el uso del sistema de frenado mecánico, así como de las diferentes condiciones que se presentan durante la conducción del vehículo, como son: topografía de la ruta, tráfico, y estilo de conducción.

El factor de frenado regenerativo, e_{rb} , es el porcentaje de la energía total del frenado regenerativo que se puede aplicar al motor eléctrico, el cual está en función de la fuerza de frenado aplicada y del diseño del tren de fuerza del vehículo. Este factor puede tomar valores entre 0 y 1 ($0 < e_{rb} < 1$) [11].

Mientras el vehículo está en modo de tracción ($P_{te}(t) > 0$), la energía fluye de las baterías de alto voltaje, pasando a través del motor y posteriormente a las ruedas. En este caso la potencia de la batería es mayor que la potencia en las ruedas y de valor positivo. Alternativamente, cuando el vehículo se frena ($P_{te}(t) < 0$) haciendo uso del sistema de frenado regenerativo, la energía fluye

de las ruedas hacia el motor y posteriormente a las baterías. En este caso, la potencia en las baterías será menor que la potencia en las ruedas y de valor negativo [57]. Estos flujos de potencia que existen en un VE que cuenta con sistema de frenado regenerativo se ilustran en la figura 3.8.

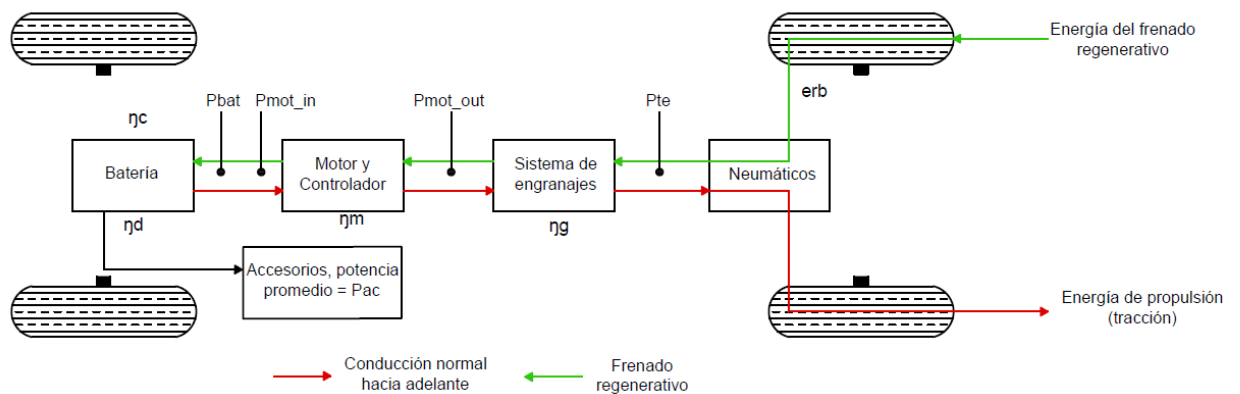


Figura 3.8: Flujos de potencia en un VE [59].

Como se observa en la figura 3.8, el punto de partida para el cálculo del modelo matemático es la potencia en las ruedas P_{te} [kW], a partir de esta se pueden calcular las potencias en cada punto del diagrama de bloques, como es la potencia del motor P_{mot} [kW] y la potencia de la batería P_{bat} [kW], cuyos valores son diferentes debido a los diversos tipos de pérdidas (efecto joule, rozamiento de partes móviles, etc.) que existen en el proceso de descarga (propulsión) y de carga (frenado regenerativo). Las pérdidas en cada una de estas etapas se encuentran representadas por sus eficiencias, como son: 1) eficiencia del sistema de engranajes, η_g , que generalmente se supone de alta eficiencia y de valor constante ya que el VE cuenta con un solo engranaje [59], 2) eficiencia del motor (generador) y su controlador, η_m , que generalmente se consideran juntas; es importante mencionar que la eficiencia del motor varía con la potencia, el par, el tamaño del motor y que puede verse influenciada por factores como la temperatura ambiente y altura sobre el nivel del mar, entre otros; y finalmente, 3) la eficiencia de la batería de alto voltaje, la cual se divide en dos: eficiencia de carga η_c y eficiencia de descarga η_d .

Por lo tanto, para obtener la energía que se extrae o se absorbe de la batería mientras el VE se desplaza, es necesario encontrar las diversas eficiencias en

todos los puntos de operación (ver figura 3.8). En secciones posteriores se definirán estos parámetros para obtener un modelo más exacto que se pueda validar con las mediciones experimentales de un VE.

Usando estas eficiencias, los flujos de potencia de la batería se pueden definir como P_{out}^{bat} [kW], que representa la potencia que sale de la batería para la locomoción del vehículo, y P_{in}^{bat} [kW] que es la potencia que ingresa a la batería como resultado del sistema de frenado regenerativo. Estos valores pueden calcularse a través de las ecuaciones (3.16) y (3.17) [71]:

$$P_{out}^{bat} = \frac{P_{te}}{\eta_m \cdot \eta_g} \quad \mapsto \quad Si P_{te} > 0 \quad (3.16)$$

$$P_{in}^{bat} = e_{rb} \cdot P_{te} \cdot \eta_m \cdot \eta_g \quad \mapsto \quad Si P_{te} < 0 \quad (3.17)$$

3.4.7. Energía

La energía es la capacidad que posee un cuerpo para realizar un trabajo. La energía, al igual que el trabajo, es una magnitud escalar y cuya unidad de medida establecida por el SI es el julio [J]; sin embargo, para el campo de la energía eléctrica se empleará como unidad de producción el kilovatio-hora [kWh].

La importancia del concepto de energía nace del principio de conservación de la energía, en donde se postula que “la energía no se crea ni se destruye solo se convierte de una forma a otra” [72]. En el caso del VE, la energía química almacenada en la batería de polímero de ion-litio se transforma casi en su totalidad en energía cinética para mover el vehículo, y parcialmente en energía térmica producto de las pérdidas suscitadas en el proceso.

La energía mecánica requerida por el VE para su locomoción se calcula mediante la ecuación (3.18), la cual es directamente proporcional a la velocidad:

$$E_{te} = \int \mathbf{F}_{te} \cdot \mathbf{v}(t) dt = \int P_{te} dt \quad (3.18)$$

En base a estos conceptos y a lo expuesto en la sección 3.4.6, los flujos de energía en la batería son calculados como se muestra en las ecuaciones (3.19) y (3.20), donde E_c^{bat} [kWh] es la energía de carga y E_d^{bat} [kWh] es la energía de descarga. Además, debe considerarse el consumo de los diferentes equipos

periféricos del vehículo, como equipos de audio/video y aire acondicionado/calefacción, entre otros, mediante un valor adicional de potencia, denominado potencia auxiliar P_{aux} [kW]. Finalmente, el flujo neto de energía desde o hacia la batería queda determinado por ΔE^{bat} [kWh] [71], como se muestra en la ecuación (3.21).

$$E_d^{bat} = \frac{1}{n_d} * \int (P_{out}^{bat} + P_{aux}) dt \quad \mapsto \quad \text{caso conducción} \quad (3.19)$$

$$E_c^{bat} = n_c * \int P_{in}^{bat} dt \quad \mapsto \quad \text{caso freno regenerativo} \quad (3.20)$$

$$\Delta E^{bat} = E_d^{bat} + E_c^{bat} \quad (3.21)$$



Capítulo 4. Metodología para la adquisición de datos del vehículo eléctrico e implementación del modelo matemático

4.1. Introducción

La metodología hace referencia al conjunto de procedimientos que se utilizan para lograr los objetivos en una investigación científica y/o estudio [73]. Es una de las etapas específicas de un trabajo experimental que parte de una base teórica para sustentar y justificar el problema de investigación, y que conduce a la selección de un método o mecanismo para realizar el procedimiento destinado a la ejecución de tareas vinculadas al estudio [74].

Este trabajo se basa en la investigación, medición, modelación y experimentación del consumo energético de un VE, empleando la estrategia heurística conocida como “el trabajo hacia adelante”, en donde se parte de lo dado (datos adquiridos del computador del vehículo eléctrico y modelo matemático estudiado) para realizar diversas actividades (implementación del modelo matemático y calibración del mismo a partir de los datos experimentales) que conduzcan a la solución del problema o alcance de los objetivos (estimación del consumo energético del vehículo y la selección de puntos para la ubicación de estaciones de carga) [75].

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para obtener el consumo energético aproximado del VE, en donde se muestra el proceso de adquisición de datos del vehículo mediante los equipos utilizados, así como se presentan parámetros técnicos del Kia Soul EV y ecuaciones complementarias que son necesarias para la implementación del modelo matemático en Matlab.

El modelo matemático es calibrado y adaptado a las condiciones de nuestro entorno. Además, este se valida mediante rutas de prueba con la finalidad de “obtener resultados consistentes y replicar el estudio con un conjunto distinto de datos, pero obtenidos siguiendo el mismo diseño experimental” [76], para que de esta manera el estudio adquiera valor científico y pueda ser presentado y probado confiablemente en la ruta de estudio Cuenca – Guayaquil vía E582.

4.2. Equipos utilizados

4.2.1. Kia Soul EV modelo 2016

El Kia Soul EV (ver figura 4.1) es un vehículo eléctrico fabricado por Kia Motors. Tiene dos tipos de puerto de carga: carga rápida con conector CHAdeMO y carga lenta con conector tipo 1 (SAE J1772).



Figura 4.1: Kia Soul EV.

Este vehículo dispone de cuatro modos de conducción: los modos “Drive” o “Brake” con el modo “Eco” desconectado (modo normal) y los modos “Drive” o “Brake” con el modo “Eco” conectado [77].

El modo “**B**rake” dispone de mayor capacidad de freno regenerativo para recuperar la energía cinética a través del frenado del vehículo, este modo es recomendado para desplazarse con el vehículo por la ciudad [78].

El modo “**D**rive” reduce la capacidad del frenado regenerativo, lo que permite al vehículo desplazarse como un vehículo tradicional de gasolina. Este modo es más adecuado para movilizarse en carreteras [78].

El modo “**E**co” no requiere el uso total de la potencia del vehículo, mantiene la autonomía de este controlando el consumo del motor eléctrico (limita la respuesta del motor) y el sistema de climatización, para evitar el consumo excesivo de energía eléctrica [79].

Algunas características técnicas del vehículo se muestran en la tabla 4.1:

Tabla 4.1: Características técnicas del Kia Soul EV [80] [81].

| Parámetro | | Valor / Característica | |
|--|---|---|-----------|
| Dimensiones | Longitud x anchura x altura total (mm) | 4 140 x 1 800 x 1 593 | |
| | Peso en vacío (kg) | 1492 | |
| | Peso máximo operativo (kg) | 1960 | |
| | Tamaño de neumático | 205 / 60R16 | |
| Motor | Tipo | Motor síncrono de imanes permanentes de corriente alterna | |
| | Máxima salida (kW) | 81.4 | |
| | Máximo torque (Nm) | 285 | |
| Unidad de reducción de engranajes | Máximo torque permisible (Nm) | 300 | |
| | Relación de engranaje | 8.260 | |
| EPCU | Inversor | Voltaje de entrada (V) | 240 ~ 413 |
| | LDC | Máxima salida (kW) | 1.7 |
| OBC | Máxima salida (kW) | 6.6 | |
| | Densidad de salida (kVA/ℓ) | 0.52 | |
| Batería | Tipo | Polímero de Ion-Litio | |
| | Número de Celdas / Módulos | 192 / 8 | |
| | Voltaje nominal (V) | 360 | |
| | Potencia (kW) | 90 | |
| | Energía (kWh) | 27 | |
| | Capacidad (Ah) | 75 | |
| | Densidad de energía a nivel de paquete / a nivel de celda (Wh/kg) | 97.6 / 200 | |
| | Peso (kg) / Volumen (ℓ) | 277 / 241 | |
| Rango de conducción | NEDC (km) – ciudad | 212 | |
| | EPA (km) - ciudad | 167 | |
| Eficiencia – EPA | Ciudad (kWh / 100 km) | 17.5 | |
| | Carretera (kWh / 100km) | 22.8 | |
| | Combinado (kWh / 100km) | 19.9 | |

Unidad de reducción de engranajes → Aumenta el par motor y el par aumentado se transfiere a las ruedas.

EPCU → Unidad de control de energía eléctrica (inversor + LDC).

LDC → Convertidor DC-DC de baja potencia: cargador de batería suplementaria de 12 V.

OBC → Cargador integrado: equipo de carga de batería (AC/DC).

NEDC → Nuevo ciclo de conducción europeo.

EPA → Agencia de protección medioambiental.



4.2.2. OBD2 (On Board Diagnostics)

OBD2 es la segunda generación del sistema OBD, el cual es un sistema de diagnóstico a bordo del vehículo desarrollado para monitorear y controlar los diferentes equipos y sistemas como son: motor, sistema de frenos, sistema eléctrico, sistema de refrigeración, sistema de dirección, entre otros, con la finalidad de detectar fallos eléctricos, químicos y mecánicos del vehículo por medio de la lectura de códigos de falla (DTC, por sus siglas en inglés) y de datos de sensores que permiten registrar diferentes parámetros sobre el funcionamiento del vehículo en tiempo real [82].

La industria automotriz es uno de los sectores que ha cambiado con más notoriedad en los últimos años, por lo que cada modelo de vehículo que se ha desarrollado se ha creado con nuevas características que sus versiones anteriores no tenían. Estos cambios se han desarrollado con la ayuda de diferentes unidades de control electrónico (ECU, por sus siglas en inglés) que se encuentran en el vehículo [83]. Estas unidades son dispositivos electrónicos que están conectados a diferentes sensores y actuadores. Los sensores supervisan y proporcionan información sobre el funcionamiento del vehículo y los actuadores ejecutan comandos de respuesta para actuar sobre alguna función en el vehículo [84]. Un vehículo moderno cuenta con 50 o más unidades de control electrónico que desempeñan diversas funciones en diversos subsistemas [85].

El protocolo OBD2 se basa en la arquitectura de red de área de control (CAN bus, por sus siglas en inglés), la cual es un sistema de comunicación que conecta las diferentes ECU para el correcto funcionamiento y operación del vehículo [85].

Existen dos redes CAN bus: una que trabaja a una velocidad de 1 Mbit/s y que se utiliza para monitorear el motor e interconectar la ECU, y la otra que se utiliza para comunicar otras partes del vehículo como puertas, asientos o luces y funciona a una velocidad de 250 Kbit/s [83].

La trama de datos de un CAN bus está formado por un identificador y una carga de datos. La carga de datos permite enviar información de hasta 8 Bytes.

El identificador puede ser del formato estándar (11 bits) o formato extendido (29 bits), aunque generalmente se utiliza el formato estándar [83].

Existen dos métodos para extraer la información del CAN bus de un vehículo:

1. **“Herramienta de olfateo”**: lee el tráfico de información de la trama de datos e inyecta la información a la red. Generalmente se utiliza un escudo CAN bus para interactuar con una placa Arduino, el cual está formado por un controlador Microchip MCP2515 junto con un transceptor MCO2551, y requieren que los usuarios programen su propio firmware de interpretación [85].
2. **“Adaptador OBD”**: llamado también “dongle OBD”, por sus siglas en inglés. Interpreta el tráfico de información de la trama de datos y los convierte en parámetros legibles que se retransmiten como mensajes en serie. Los adaptadores OBD más comunes usan hardware ELM327, aunque últimamente se emplean chips STN1110, los cuales funcionan como un puente que conectan el puerto OBD a un puerto serie RS323 estándar [85].

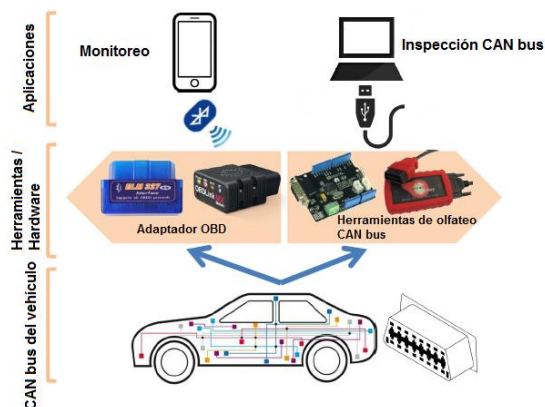


Figura 4.2: Proceso de obtención de datos del vehículo [85].

1.1.1. Hardware ELM327

El ELM327 es un microcontrolador programado que interpreta la interfaz de diagnóstico del vehículo para transmitir datos desde un vehículo compatible con OBD2 a computadoras, teléfonos inteligentes y tabletas por medio de Bluetooth, Wifi o cable USB. Este dispositivo permite recibir información en tiempo real de

la ECU, leer y borrar los códigos de problemas asociados con la luz de verificación del motor, o mejor conocida como luz “check engine” [83].

Tiene la capacidad de trabajar con nueve protocolos CAN diferentes, además de detectar automáticamente el protocolo utilizado por la ECU. Es compatible con los protocolos SAE e ISO [86].



Figura 4.3: Dispositivo ELM327 [87].

4.2.3. Software Torque pro

Es un software o aplicación que permite que cualquier computador o teléfono, a través de Bluetooth o cable USB, se comunice con el vehículo por medio de dispositivos habilitados para OBD2 como el ELM327, para de esta forma obtener información sobre el mismo, como puede ser: tiempo de viaje, distancia recorrida, velocidad, aceleración, CO₂ emitido, consumo de combustible, par motor, entre otros.

Además, el software permite instalar códigos de información de parámetros (PIDs) en función del tipo de vehículo que se disponga, a partir de los cuales se obtiene información más detallada de variables de condición u operación del vehículo.

La aplicación posee una interfaz amigable con el usuario, ya que permite visualizar lecturas de determinados parámetros en tiempo real, como son: tiempo de viaje, temperatura de los sensores, voltaje de la batería, corriente de la batería, eficiencia, entre otros parámetros.



Figura 4.4: Aplicación Torque Pro.

4.2.4. Teléfono inteligente Huawei Mate 20 Lite

El teléfono se emplea para el registro de datos extraídos de la ECU del vehículo a través del dispositivo ELM327 y el software Torque Pro. Por medio de este dispositivo se obtiene un archivo “.csv” con los datos obtenidos de la ruta recorrida.

El dispositivo está formado por un procesador Hisilicon Kirin 710 octa-core de 2.2 GHz, cuenta con una memoria interna de 4 GB de RAM y 64 GB de almacenamiento, y tiene una conectividad GPS con soporte A-GPS, GLONASS y BDS [88].



Figura 4.5: Teléfono Huawei Mate 20 Lite [89].

4.2.5. Navegador GPS Garmin Monterra

El Garmin Monterra es un dispositivo inteligente que cuenta con un sistema de posicionamiento global (GPS, por sus siglas en inglés) portátil Outdoor, sistema operativo Android y Wi-Fi. Tiene 8 GB de memoria interna más una ranura microSD para almacenamiento adicional de hasta 64 GB. El equipo utiliza un sistema de doble batería: batería de ion-litio recargable o tres pilas AA reemplazables [90].

El sistema de navegación de este equipo está formado por receptores de GPS y GLONASS de alta potencia. Además, cuenta con una brújula de tres ejes con acelerómetro y giroscopio, y un altímetro barométrico, permitiendo mejorar la precisión del posicionamiento [91].

Este dispositivo permite la lectura, intercambio y almacenamiento de información de datos GPS como: latitud, longitud y altitud, entre otros. Estos datos son usados para describir puntos, recorridos y rutas por medio de un archivo con extensión “.gpx”, conocido como “Formato de Intercambio GPS (GPS eXchange Format)”, el cual utiliza el formato XML, lo que permite que el archivo pueda ser leído e importado en distintos dispositivos inteligentes.



Figura 4.6: GPS Garmin Monterra [92].

4.3. Procedimiento de adquisición de datos

El proceso de adquisición de datos en un ambiente real de conducción empieza mediante la correcta configuración de los equipos que intervienen durante el recorrido del vehículo, como son: aplicación Torque Pro, que permite leer y almacenar los parámetros del VE en el teléfono inteligente, y el GPS Garmin Monterra empleado como un equipo auxiliar para almacenar los puntos del recorrido (ver figura 4.7) en caso de alguna falla en el teléfono o que los datos registrados por el teléfono fuesen erróneos. Además, el archivo de datos obtenido del GPS al finalizar el recorrido permite verificar que los datos obtenidos por la aplicación de teléfono móvil, como: altitud, longitud, latitud, velocidad y distancia del recorrido sean correctos.

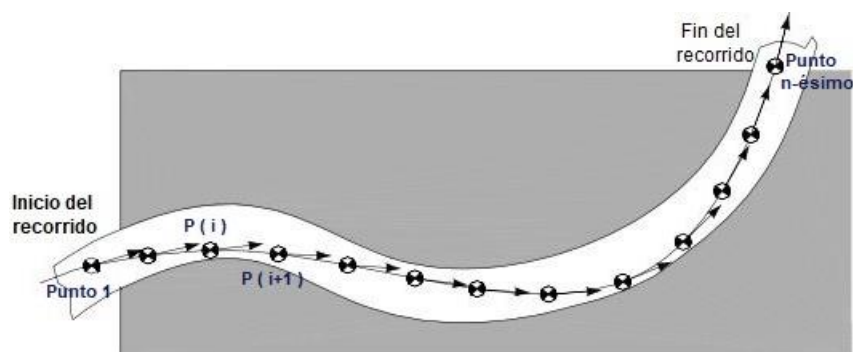


Figura 4.7: Representación de la adquisición de datos por parte del teléfono y GPS en una ruta.

▪ Teléfono Huawei Mate 20 Lite

Se debe configurar la aplicación de celular Torque Pro mediante la descarga desde el internet de los códigos PIDs del Kia Soul EV 27 kWh [93], los cuales son:

- Kia_Soul_EV_Battery_Cell_data.csv
- Kia_Soul_EV_Extra_gauges.csv
- Kia_Soul_EV_LDC_data.csv
- Kia_Soul_EV_OBC_data.csv
- Kia_Soul_EV_TPMS_data.csv
- Kia_Soul_EV_VIN_data.csv
- Kia_Soul_EV_VMCU_data.csv

Una vez descargados, se procede a copiarlos a la carpeta raíz “extendedpids” de la aplicación Torque Pro, este proceso se lo realiza a través de una aplicación de administración de archivos de teléfono llamada *Ghost Commander*.

Ya copiados los PIDs, se ingresa en “Configuración” del programa Torque Pro y se selecciona la opción “Gestionar PIDs/Sensors extra” en donde por medio de la opción “Añadir conjunto predefinido” se añaden a la aplicación los PIDs descargados, de esta manera se observa en la pantalla los medidores digitales junto con sus lecturas en tiempo real de las variables que se pueden obtener del VE.



Es importante identificar cuáles son las variables principales en este estudio, ya que estas se almacenarán en el teléfono celular y se deberán añadir en una ventana personalizada de la aplicación Torque Pro para su medición en tiempo real. Las variables seleccionadas son las que se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Variables utilizadas en el estudio para la obtención de datos del VE.

| Variables | Unidades |
|-------------------------------|------------------|
| GPS Altitud | m |
| GPS Latitud | Grados decimales |
| GPS Longitud | Grados decimales |
| GPS Precisión | m |
| Distancia total del viaje | km |
| Tiempo del viaje | s |
| Velocidad GPS | km/h |
| Velocidad OBD | m/s |
| Energía de carga acumulada | kWh |
| Energía de descarga acumulada | kWh |
| Estado de carga BMS | % |
| Estado de carga Display | % |

Estas variables nos permiten obtener datos primordiales del VE, algunas de estas ingresarán como variables de entrada en el modelo matemático estudiado que se implementará en Matlab (altitud, latitud, longitud, tiempo y velocidad), y otras servirán para comparar y validar los valores de consumo de energía del vehículo con los obtenidos mediante el modelo implementado (energía de carga y de descarga).

De igual manera, es importante seleccionar el intervalo de registro de datos del VE en el programa Torque Pro, por lo que en la opción “Intervalo de archivo de registro” se puede configurar la frecuencia de muestreo entre 0.2 Hz y 10 Hz. Para el estudio se selecciona una frecuencia de muestreo de un 1 Hz, equivalente a 1 segundo.

Finalmente, se debe vincular el teléfono celular con el dispositivo ELM327 por medio de Bluetooth, para esto el dispositivo ELM327 debe estar conectado al

puerto OBD del vehículo. Además, se debe verificar que el dispositivo se haya conectado correctamente a la ECU del vehículo mediante la opción “Adapter Status” en el programa Torque Pro.

▪ **GPS – Garmin Monterra**

Para configurar el GPS es necesario tener los mapas del país instalados y actualizados en el dispositivo, los cuales pueden ser descargados de la página web de Open Street Map [94].

Asimismo, se deberá seleccionar la frecuencia de muestreo de 1 Hz para que el número de datos obtenidos en cada recorrido sea similar a los datos obtenidos en la aplicación Torque Pro. Para esto, se ingresa en la opción “Configuración” de la aplicación Track Manager, se selecciona “Tiempo” en la opción “Método de grabación” y, por último se selecciona 1 segundo equivalente 1 Hz en la opción “Intervalo”. Las variables que se almacenan en el GPS son las que se muestran en la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Variables que se obtienen del GPS Garmin Monterra.

| Variables | Unidades |
|---------------------|------------------|
| GPS Altitud | m |
| GPS Latitud | Grados decimales |
| GPS Longitud | Grados decimales |
| GPS Precisión | m |
| Distancia del viaje | km |
| Tiempo del viaje | s |
| Velocidad GPS | km/h |

4.3.1. Obtención de datos

El registro de datos se obtendrá en el GPS Garmin Monterra y del dispositivo ELM327 a través teléfono inteligente Huawei Mate 20 Lite.

Para la obtención de datos se deben considerar los pasos que se indican en el diagrama de flujo que se presenta en figura 4.8.

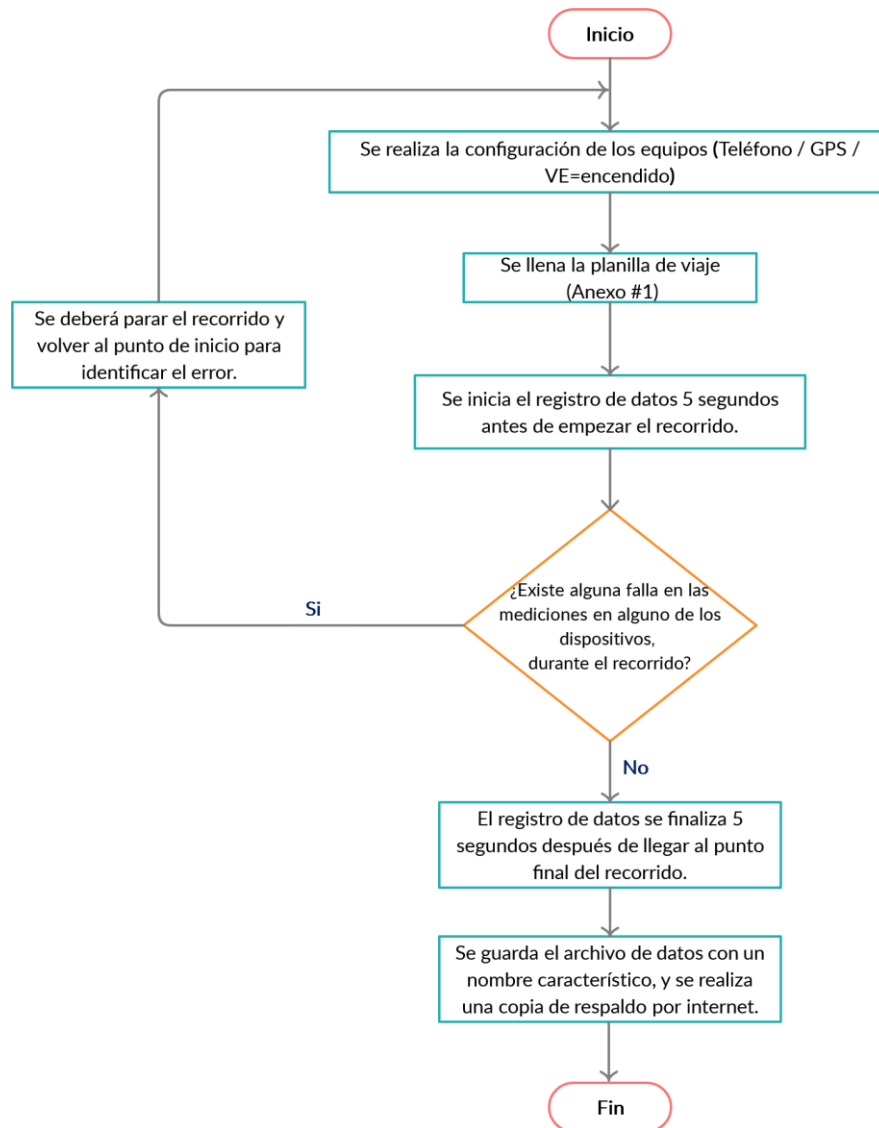


Figura 4.8: Diagrama de flujo para la obtención de datos del vehículo.

▪ Teléfono

Para la correcta obtención de datos del VE, el registro de datos desde el Programa Torque Pro debe iniciar unos segundos antes de empezar el recorrido y terminar segundos después de llegar al destino final.

Finalizado el recorrido se obtiene un archivo de formato “.csv” o también conocido como archivo de valores separados por comas, para visualizar los datos extraídos del vehículo mediante Excel, y un archivo de formato “.kml” que



permite representar datos geográficos en tres dimensiones, para observar el gráfico del recorrido mediante un software visualizador como Google Earth.

▪ **GPS**

Para obtener los datos del recorrido se deberá grabar la ruta realizada mediante la aplicación Track Manager, seleccionando la opción “Track actual”. De igual forma, se debe iniciar la grabación del recorrido unos segundos antes del inicio de éste y terminar la grabación unos segundos después de llegar al destino final.

Finalizado el recorrido se obtiene un archivo “.gpx”, el cual será importado al software MapSource para obtener los valores de hora, altura, latitud, longitud, longitud del tramo, tiempo y velocidad. Además, el programa permite generar un gráfico de perfil de elevación y mostrar la ruta realizada en el mapa. Los datos obtenidos en el software pueden ser copiados a Excel o puede utilizarse un convertidor de archivos “.gpx” a “.xlsx” en línea [95] para obtener los datos de tiempo, latitud, longitud y altitud necesarios para la implementación del modelo matemático.

El archivo “.gpx” también puede ser importado a la página web uTrack [96] para generar un reporte de la ruta grabada. El reporte consta de la ruta en el mapa de Google Maps, además del perfil de elevación, velocidad y distancia recorrida.

4.3.2. Factores que influyen en la adquisición de datos

“Todas las medidas experimentales vienen afectadas de una cierta imprecisión que es inevitable por las medidas y calibraciones de los equipos de medida, o debido a las limitaciones impuestas por nuestros sentidos que registran esta información” [97], es por esto que en un estudio experimental es “inverosímil” encontrar un valor cierto o exacto de una magnitud determinada, por lo que se deben establecer límites dentro de los cuales se encuentra ese valor o un porcentaje de error aceptado para que la información resultante tenga aceptación y validez dentro del campo científico.



4.3.2.1. Equipos / Dispositivos

Los equipos y sistemas de adquisición de datos influyen de manera directa en la calidad de la parte experimental de un estudio. La correcta selección de estos equipos es clave para obtener los resultados esperados y apropiados en un estudio [98].

Algunos de los factores que influyen en la calidad de los datos en un estudio experimental se presentan a continuación.

- **Frecuencia de muestreo**

La frecuencia de muestreo indica la “velocidad a la cual un sistema de adquisición de datos recopila datos” [99], y esta velocidad se expresa como el “número de muestras que se recopila por unidad de tiempo” [100] por lo que a mayor frecuencia de muestreo existe mayor cantidad de registro de muestras en intervalos de tiempo más pequeños.

Este factor es importante ya que a mayor cantidad de muestras recopiladas, menor es el error que se obtiene en el cálculo del consumo de energía del VE en el recorrido; sin embargo, se debe buscar un equilibrio entre la frecuencia de muestreo y la capacidad de procesamiento de las señales del dispositivo [101].

En este estudio se debe considerar la frecuencia de muestreo del dispositivo ELM327 a través del programa Torque Pro, y la frecuencia de muestreo del GPS Garmin Monterra. En el documento “Estudio de la influencia en la frecuencia de muestreo en dispositivos de recolección de datos en OBD II mediante análisis de varianza” [102] se menciona que la frecuencia de muestreo del dispositivo ELM327 se reduce según aumenta el número de sensores analizados, por lo que se sugiere muestrear de forma independiente cada sensor para no afectar directamente la frecuencia de muestreo del dispositivo de adquisición de datos.

- **Precisión del equipo**

La precisión “es el detalle con el que un instrumento o procedimiento puede medir una variable” [103]. La precisión del equipo de medición utilizado en un



experimento es importante, ya que de este dependerá que los resultados del estudio sean más precisos y fiables.

En este estudio hay que tener presente la precisión del GPS del teléfono celular y del navegador GPS Garmin. “Los receptores del GPS Garmin tienen una precisión de 15 metros el 95 % del tiempo con una vista clara del cielo, y generalmente una precisión de 5 a 10 metros en condiciones normales” [104], y los receptores del teléfono celular tienen una precisión que se encuentra entre los 5 y 15 metros [105].

En el caso de los dispositivos que hacen uso del GPS, la precisión se ve afectada por diversas fuentes de error que pueden presentarse durante la propagación de la señal del satélite hacia el receptor, como son: condiciones climatológicas, espacios cerrados, reflexión de la señal, ruido, entre otros; sin embargo, la tecnología del navegador GPS Garmin, a diferencia de un teléfono celular, permite obtener una buena y precisa recepción GPS, al tratarse de un dispositivo destinado específicamente para establecer la posición en coordenadas de latitud y longitud en cualquier lugar de la Tierra [106].

4.4. Implementación del modelo matemático

El modelo matemático que permite obtener el consumo energético aproximado del VE se implementa en el software computacional Matlab, debido a su amplia aceptación dentro del campo de la ingeniería para la resolución de diferentes problemas matemáticos, utilizando los registros de datos de las variables del VE exportados a Excel que se obtuvieron en el teléfono celular y en el GPS

Como se muestra en el Anexo #2, cada variable medida durante el recorrido se ubica en una columna del archivo de Excel, mientras que cada medición realizada se ubica en las filas. Cada uno de estos arreglos de datos se ingresan a Matlab como variables de entrada que se almacenan en un vector $[n \times 1]$, además se ingresan por teclado otras variables de entrada importantes en la implementación del modelo, como son los datos específicos del vehículo Kia Soul EV 2016: masa total del vehículo y coeficiente de arrastre aerodinámico.



El modelo se desarrolla mediante un proceso iterativo hasta obtener como resultado la energía de carga, energía de descarga y el consumo neto de energía durante el recorrido. Estos resultados se comparan con los datos obtenidos de la computadora del vehículo como mecanismo de validación de este modelo, permitiendo en este estudio un porcentaje máximo de error de 20 %, debido a que el modelo implementado nace del método analítico de la dinámica vehicular la cual describe el comportamiento mecánico del vehículo fundamentándose en las leyes de la Física Mecánica mediante ecuaciones matemáticas, por lo que los resultados deben interpretarse como una estimación aproximada de la realidad.

En la figura 4.9 se muestra el diagrama de flujo para obtener el consumo de energía del VE, y posteriormente se desarrolla el proceso de cálculo que se implementa en Matlab.

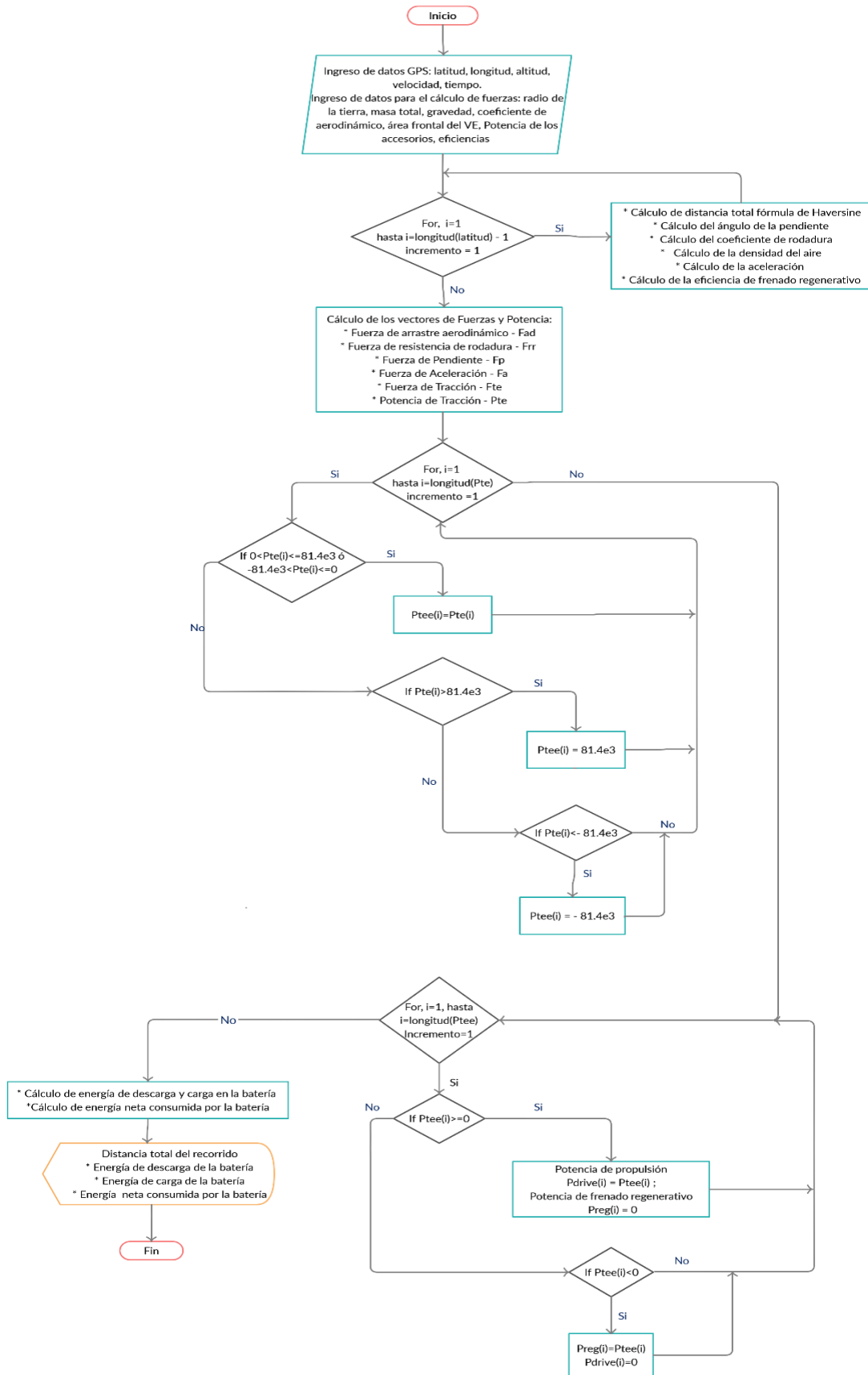


Figura 4.9: Diagrama de flujo para la obtención del consumo de energía del VE.

4.4.1. Cálculo de distancia entre dos puntos geográficos

Para calcular la distancia entre dos puntos geográficos se utiliza la fórmula de Haversine, en la cual se aproxima la geometría de la Tierra usando el modelo de la esfera terrestre [107] a partir de datos de latitud y longitud de los dos puntos geográficos, y el radio de la Tierra [108].

Debido a que la Tierra no es una esfera perfecta, existen radios de diferente longitud dada su geometría de esferoide oblato, como es el radio ecuatorial ($R = 6378 \text{ km}$), radio polar ($R = 6356 \text{ km}$) y el radio medio volumétrico ($R = 6371 \text{ km}$) [109]. Para este estudio se toma como referencia el radio medio volumétrico.

La fórmula de Haversine [108] se expresa en términos de dos funciones de Haversine o múltiplos de esta [107]:

$$\Delta\textit{latitud} = \textit{latitud}_{i+1} - \textit{latitud}_i \quad (4.1)$$

$$\Delta\textit{longitud} = \textit{longitud}_{i+1} - \textit{longitud}_i \quad (4.2)$$

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta\textit{latitud}}{2}\right) + \cos(\textit{latitud}_i) \cdot \cos(\textit{latitud}_{i+1}) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\textit{longitud}}{2}\right) \quad (4.3)$$

$$c = 2 \cdot \textit{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}) \quad (4.4)$$

$$D = R \cdot c \quad (4.5)$$

Donde i es la posición del vector de latitud y del vector de longitud, D [km] es el vector de la distancia entre el punto geográfico $i + 1$ y el punto geográfico i , y R [km] es el radio de la tierra. Los valores de $\textit{latitud}$ y $\textit{longitud}$ deben estar en radianes.

El proceso de cálculo es iterativo y consiste en tomar de las variables que almacenan los vectores de latitud y longitud, los valores i e $i + 1$ durante cada iteración para calcular la distancia que existe entre estos dos puntos y almacenarlos en una variable, para posteriormente sumar todos estos intervalos de distancia y obtener la distancia total recorrida. Finalmente, se comparan los valores obtenidos mediante el modelo matemático con los adquiridos mediante las rutas experimentales, a través de la computadora del vehículo, así como del registro del trayecto (tracklog) del GPS.

Con el vector de distancia (D) obtenido se calcula el ángulo de inclinación de la pendiente de la trayectoria.

4.4.2. Cálculo de ángulo de pendiente

El ángulo de inclinación de la pendiente de la trayectoria se calcula durante cada iteración para cada valor de altura y distancia, por lo que al final se obtiene un vector con todos los ángulos de la ruta.

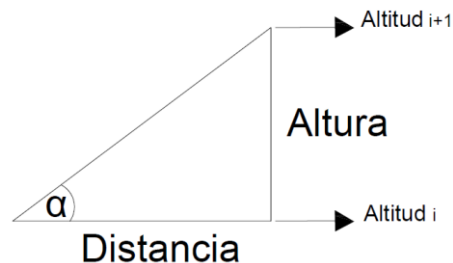


Figura 4.10: Cálculo de ángulo de pendiente [110].

Para este cálculo se toma en consideración la figura 4.10. Se resuelve el triángulo rectángulo para hallar el valor de α a partir de los dos catetos conocidos: distancia y altura, como se muestra en las ecuaciones (4.6) y (4.7).

$$Altura = altitud_{i+1} - altitud_i \quad (4.6)$$

$$\alpha = atan\left(\frac{Altura}{1000 \cdot D}\right) \quad (4.7)$$

Donde α [rad] es el ángulo de la pendiente de la trayectoria, $Altura$ [m] es la diferencia entre el valor de altitud en la posición $i + 1$ y la posición i .

El ángulo de inclinación será positivo cuando el vehículo suba una pendiente y será negativo cuando descienda una pendiente.

4.4.3. Cálculo de densidad del aire

La densidad del aire “es la relación entre la masa y el volumen del aire, siendo su valor 1.225 kg/m^3 a la presión atmosférica normal y a 15°C , aunque disminuye con la humedad, la temperatura, y la altitud, y por tanto influye en la energía cinética del viento” [111].

Para calcular la densidad del aire se toma en consideración que esta varía con la altitud, por lo que se toma como referencia la tabla 4.4:

Tabla 4.4: Variación de la densidad del aire según la altitud [112] [113].

| Altitud [m] | Densidad de aire ρ_a [kg/m^3] |
|-------------|--|
| x_i | y_i |
| 0 | 1.225 |
| 200 | 1.202 |
| 400 | 1.179 |
| 600 | 1.156 |
| 800 | 1.134 |
| 1000 | 1.112 |
| 1200 | 1.090 |
| 1400 | 1.070 |
| 1600 | 1.048 |
| 1800 | 1.027 |
| 2000 | 1.007 |
| 2200 | 0.987 |
| 2400 | 0.967 |
| 2600 | 0.947 |
| 2800 | 0.928 |
| 3000 | 0.909 |
| 4000 | 0.8194 |
| 5000 | 0.7364 |
| 6000 | 0.6601 |

Como los valores de altitud no siempre son los mismos que los valores de la tabla 4.4, se debe hacer una interpolación lineal para estimar el valor de densidad de aire a partir de los valores de referencia de la tabla. Para obtener el valor se utiliza la ecuación (4.8) [114]:

$$y = y_1 + \frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} \cdot (y_2 - y_1) \quad (4.8)$$

Donde y es el valor de densidad de aire a encontrar, x es el valor de altitud de referencia, x_1 y x_2 son los valores de altitud que se encuentran en la tabla y que cumplen la relación $x_1 < x < x_2$ y, y_1, y_2 son los valores de densidad de aire que corresponden a los valores de x_1 y x_2 .

4.4.4. Cálculo de fuerzas

Para el cálculo de la fuerza de tracción se toman como datos los valores calculados en la sección 4.4.1, 4.4.2, 4.4.3 y los valores de la tabla 4.5.

Tabla 4.5: Especificaciones técnicas del Kia Soul EV 2016 [115].

| Variable | Valor |
|--------------------------------------|-------|
| Coeficiente de arrastre aerodinámico | 0.35 |
| Masa [kg] | 1492 |

4.4.4.1. Fuerza de resistencia a la rodadura

Para el cálculo de la fuerza de resistencia a la rodadura, definida en la ecuación (3.5), se tiene en cuenta las siguientes consideraciones.

- El coeficiente de resistencia a la rodadura se calcula en base a la ecuación (4.9) desarrollada por el Instituto de Tecnología en Stuttgart para el rodamiento de vehículos sobre superficies de concreto [63].

$$f_{rr} = f_0 + 3.24 \cdot f_s \cdot \left(\frac{1609 \cdot v}{3600 \cdot 100} \right)^{2.5} \quad (4.9)$$

Donde v [m/s] es la velocidad del vehículo, y los coeficientes adimensionales f_0 y f_s dependen de la presión de inflado del neumático, y se obtienen a partir de la figura 4.11.

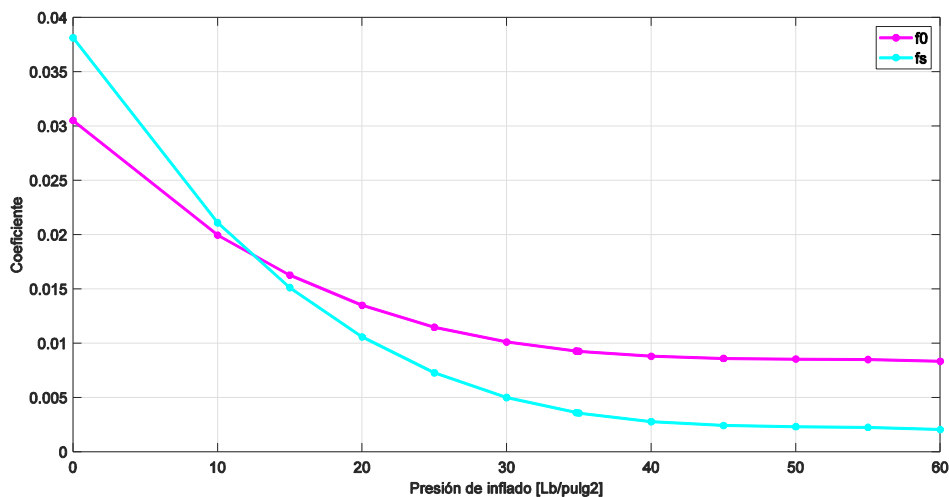


Figura 4.11: Coeficiente de resistencia a la rodadura del modelo de Stuttgart.

Con base en la figura 4.11 y a la medición realizada de la presión de inflado de los neumáticos del Kia Soul EV, la cual es 2.4 bares (ver figura 4.12) equivalente a 34.8091 Lb/pulg², se obtiene el valor de los coeficientes $f_0 = 0.009275271$ y $f_s = 0.003603184$.



Figura 4.12: Presión de inflado del neumático del Kia Soul EV.

- La masa total que el VE tiene que transportar se define mediante la ecuación (4.10), en donde la masa específica del vehículo se presenta en la Tabla 4.5, y la masa de los pasajeros y equipaje es variable, dependiendo de cada recorrido.

$$m_{total}[kg] = m_{pasajeros} + m_{equipaje} + m_{VE} \quad (4.10)$$

- Se considera un valor de gravedad $g = 9.81 [m/s^2]$.
- Se emplean los ángulos de la pendiente calculados en la sección 4.4.2, los cuales deben estar expresado en *radianes*.

4.4.4.2. Fuerza de arrastre aerodinámico

Para calcular la fuerza de arrastre aerodinámico se utiliza la ecuación (3.7), en donde:

- La densidad del aire se calcula como se muestra en la sección 4.4.3.
- Se considera el valor del coeficiente de arrastre aerodinámico indicado en la Tabla 4.5.
- El área frontal del vehículo se determina en base a la siguiente formulación [116].

$$A_f = 1.6 + 0.00056 \cdot (m_{VE} - 765) \quad (4.11)$$

Por lo que:

$$A_f = 1.6 + 0.00056 \cdot (1492 - 765) = 2.00712 [m^2] \quad (4.12)$$

4.4.4.3. Fuerza de la pendiente

Para calcular la fuerza de la pendiente se utiliza la ecuación (3.8) y se toma en consideración:

- La masa total del vehículo se calcula como se indica en la ecuación (4.10).
- Se emplean los ángulos de la pendiente calculados en la sección 4.4.2, los cuales deben estar expresado en *radianes*.

4.4.4.4. Fuerza de aceleración lineal

Para calcular la fuerza de aceleración lineal se utiliza la ecuación (3.11) y se tiene en cuenta:

- La masa total del vehículo se calcula como se indica en la ecuación (4.10).
- Se calcula el vector de aceleración promedio a partir de los datos del vector de velocidad y el vector de tiempo obtenidos por medio del dispositivo ELM327, como se muestra en la ecuación (4.13).

$$\mathbf{a} = \frac{v_{i+1} - v_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (4.13)$$

Donde i es la posición del vector de velocidad y vector de tiempo, \mathbf{a} [m/s^2] es la aceleración promedio y t [s] es el tiempo.

4.4.4.5. Fuerza de tracción

Utilizando la ecuación (3.12), se suman todas las fuerzas anteriormente mencionadas para obtener un vector resultante de fuerza de tracción F_{te} .

4.4.5. Cálculo de potencia de tracción

El vector de potencia de tracción se obtiene mediante la multiplicación del vector de fuerza de tracción calculado anteriormente por la velocidad del vehículo obtenido para cada muestra de tiempo durante la trayectoria, como se indica en la ecuación (3.15).

Los valores de potencia de tracción, P_{te} , serán positivos cuando la batería de alto voltaje del vehículo entregue energía, y serán negativos cuando la batería de alto voltaje reciba energía a partir del frenado regenerativo.

4.4.6. Eficiencias

Los valores de eficiencias utilizados se muestran en la tabla 4.6:

Tabla 4.6: Eficiencias del VE.

| Eficiencia | Símbolo | Valor |
|------------------------|----------|--------|
| Motor | η_m | 0.9899 |
| Sistema de engranajes | η_g | 0.9899 |
| Carga de la batería | η_c | 0.8500 |
| Descarga de la batería | η_d | 0.8750 |

Los valores de eficiencias mostrados en la tabla 4.6 fueron calibrados mediante rutas de prueba con el VE.

El factor de frenado regenerativo indica el porcentaje de la energía total de frenado que puede recuperar el motor (generador). Existen diversas fórmulas empíricas para su cálculo, las cuales están relacionadas con diferentes factores, como: aceleración, velocidad, fuerza de frenado, entre otros. Para este estudio se emplea la ecuación (4.14) [117].

$$e_{rb} = \begin{cases} 0.5 \cdot \frac{v}{5} & v < 5 \text{ [m/s]} \\ 0.5 + 0.3 \cdot \frac{v - 5}{20} & v \geq 5 \text{ [m/s]} \end{cases} \quad (4.14)$$

4.4.7. Cálculo de flujos de potencia de la batería

Para calcular los flujos de potencia de la batería se separa el vector de potencia de tracción en dos vectores: un vector que contenga únicamente los valores positivos de la potencia de tracción, y otro vector que contenga únicamente los valores negativos de la potencia de tracción.

Con estos vectores y los valores de eficiencias de la tabla 4.6, se calcula la potencia que sale de la batería para la locomoción del vehículo, P_{out}^{bat} , como se

expresa en la ecuación (3.16), a partir de los valores positivos de potencia de tracción; de igual manera se calcula la potencia que ingresa a la batería como resultado del sistema de frenado regenerativo, P_{in}^{bat} , como se muestra en la ecuación (3.17), a partir de los valores negativos de la potencia de tracción.

Como resultados se obtienen dos vectores: P_{out}^{bat} y P_{in}^{bat} .

4.4.8. Cálculo de flujos de energía

Para calcular los flujos de energía de la batería se utiliza la ecuación (3.19) y (3.20), en donde se integran los valores de P_{out}^{bat} y P_{in}^{bat} para obtener la energía total que entregó la batería de alto voltaje (E_d^{bat}) y la energía total que recibió la batería de alto voltaje en el recorrido (E_c^{bat}).

El valor de la potencia auxiliar P_{aux} necesaria para calcular E_d^{bat} deberá tener en cuenta la potencia de los equipos periféricos del vehículo que estén en funcionamiento durante el recorrido. En este estudio se considera un valor promedio de $P_{aux} = 1000 W$, tomando como referencia el estudio “Electric vehicle’s electricity consumption on a road with different slope” [117].

4.4.9. Cálculo de flujo neto de energía de la batería

Finalmente, a partir de la ecuación (3.21) y los valores de E_d^{bat} y E_c^{bat} obtenidos anteriormente, se obtiene como resultado el flujo neto de energía de la batería ΔE^{bat} .

4.5. Modelo experimental

Los datos obtenidos de energía de carga acumulada y energía de descarga acumulada desde la ECU del VE permiten obtener el flujo neto de energía que la batería de alto de voltaje entregó para la propulsión del vehículo, y que recibió por medio del frenado regenerativo durante el recorrido.

Para obtener este valor se deben restar los datos de energía de carga acumulada final e inicial, como se muestra en la ecuación (4.15), y de igual forma con los datos de energía de descarga acumulada, como se presenta en la ecuación (4.16), para finalmente calcular la energía neta consumida por la batería del VE, como se indica en la ecuación (4.17).



$$E_{total\,carga_acum} = E_{carga_acum_final} - E_{carga_acum_inicial} \quad (4.15)$$

$$E_{total\,descarga_acum} = E_{descarga_acum_final} - E_{descarga_acum_inicial} \quad (4.16)$$

$$E_{neta\,consumida} = E_{total\,descarga_acum} - E_{total\,carga_acum} \quad (4.17)$$

4.6. Validación del modelo matemático

Para la validación del modelo matemático se realizaron preliminarmente 4 rutas en un radio de 4 km alrededor del Laboratorio de Microrred Eléctrica Campus – Balzay, con el objetivo de obtener datos de energía de carga, descarga y el consumo neto de energía del VE durante cada recorrido para calibrar el modelo. Con el modelo ya calibrado se realizaron un total de 5 rutas de prueba en 3 en vías interprovinciales y/o intercantonales, bajo diferentes condiciones de masa, velocidad, climatológicas y topográficas, con la finalidad de obtener nuevamente datos de energía para cada ensayo, y comparar estos valores con los calculados mediante el modelo matemático, obteniendo un valor promedio de error relativo menor al 10 % tanto para los cálculos de distancia total del recorrido como para los cálculos de energía de descarga, energía de carga y energía neta consumida por la batería. Los resultados de las simulaciones del modelo matemático implementado en cada una de las 5 rutas de prueba se presentan en el Anexo #3.

Cabe mencionar que en todos los viajes realizados se empleó un estilo de conducción seguro durante cada recorrido, apegado a la señalética de cada vía y al “Reglamento general para la aplicación de la ley orgánica de transporte terrestre, tránsito y seguridad vial” [118], documento en el cual se presentan los límites de velocidad para vehículos livianos, los cuales se indican en la tabla 4.7:

Tabla 4.7: Límites de velocidad para vehículos livianos [118].

| Tipo de vía | Límite máximo | Rango moderado (Art 142.g de la Ley) |
|----------------------|---------------|--------------------------------------|
| Urbana | 50 km/h | 50 km/h < v < 60 km/h |
| Perimetral | 90 km/h | 90 km/h < v < 120 km/h |
| Rectas en carreteras | 100 km/h | 100 km/h < v < 135 km/h |
| Curvas en carreteras | 60 km/h | 60 km/h < v < 75 km/h |

Estas rutas de prueba permiten determinar el consumo de energía en ambientes típicos de la sierra ecuatoriana con elevados diferenciales de altura, además del efecto presente por el frenado regenerativo.

A continuación, se presentan las rutas realizadas y las principales características bajo las cuales fueron desarrolladas.

4.6.1. Ruta 1: Cuenca – Molleturo

El recorrido empieza en el Laboratorio de Microrred Eléctrica Campus – Balzay, con coordenadas (-2.891839575,-79.0385083) hasta la entrada a la parroquia Molleturo, con coordenadas (-2.77726184,-79.39791925). Durante el recorrido de ida la velocidad máxima alcanzada fue de 92 km/h y la velocidad máxima de regreso fue de 104 km/h, teniendo una velocidad promedio total de viaje de 58 km/h. En el recorrido, el SoC inicial del VE fue 95 % y el SoC final 37.5 %. La ruta se realizó con dos pasajeros con una masa promedio de 145 kg.

En la figura 4.13 se observa el recorrido realizado por la vía colectora E582, la cual presenta características típicas de una zona montañosa del páramo andino del Ecuador. La red vial hacia Molleturo presenta hundimientos y derrumbes.

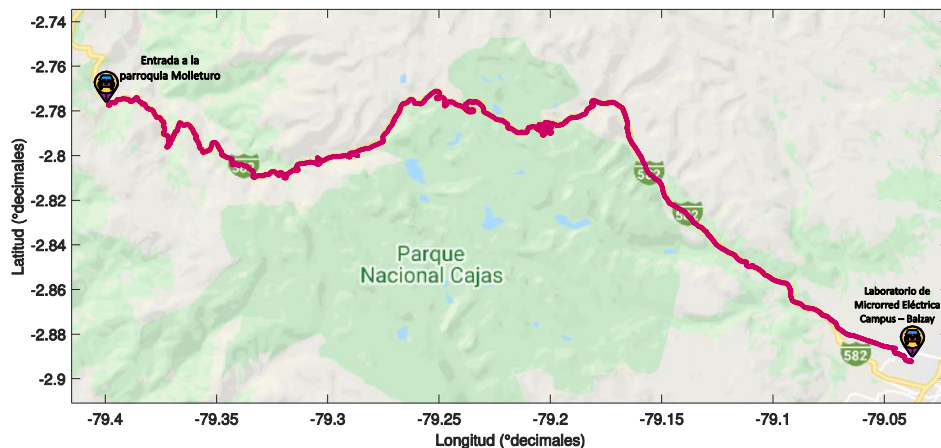


Figura 4.13: Mapa de la ruta 1: Cuenca - entrada a la parroquia Molleturo.

El recorrido presenta un perfil de elevación como se muestra en la figura 4.14, donde el punto de inicio se encuentra a una altura de 2595 m.s.n.m. y el punto final a 2522 m.s.n.m. La altitud máxima que alcanza esta ruta es 4176 m.s.n.m.,

ubicada en el sector denominado “Mirador Tres Cruces”, con coordenadas (-2.775910034,-79.246011364). La distancia entre el punto inicial y máximo es de 35.45 km, en donde el diferencial de altura entre estos puntos es de $\Delta_h=1581$ m, con una pendiente de 44.59 m/km; mientras que la distancia entre el punto máximo y final es de 27.85 km, y el diferencial de altura es de $\Delta_h=1654$ m, con una pendiente de 59.38 m/km.

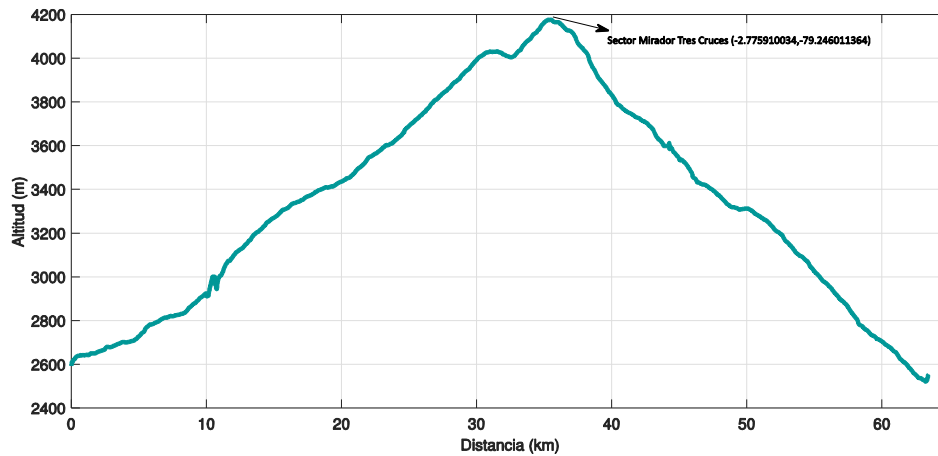


Figura 4.14: Perfil de elevación de la ruta 1: Cuenca - entrada a la parroquia Molleturo.

En la tabla 4.8 se observa que la energía de descarga es mayor a la energía de carga de la batería del VE durante el recorrido de ida, debido a que en el primer tramo de este recorrido se asciende 35.45 km con una pendiente de 44.59 m/km, por lo que el VE consume la mayor parte de la energía en su ascenso. Este comportamiento se evidencia en la figura 4.15, en donde la energía de descarga es 11.80 kWh, la energía de carga es -0.30 kWh, y la energía neta consumida es 11.50 kWh.

Los 27.85 km de recorrido del tramo final es en descenso, con una pendiente de 59.38 m/km, de manera que el VE experimenta un mayor aporte de energía desde el sistema de frenado regenerativo, por lo que en este tramo la batería experimenta un aporte de -4.40 kWh mientras que se descarga 0.70 kWh. Por lo tanto, la energía acumulada de descarga es 12.50 kWh, la energía de carga acumulada es -4.70 kWh y la energía neta consumida durante todo el recorrido de ida es 7.80 kWh, como se muestra en la figura 4.15, con una tasa de consumo de 0.123 kWh/km, y un SoC final de 68.5 %, equivalente a 19.64 kWh de autonomía.

En la tabla 4.8 se muestra la comparación y el error relativo entre el modelo matemático y el consumo de energía real obtenido durante este recorrido.

Tabla 4.8: Porcentaje de error relativo en la ruta 1 de ida.

| | Modelo matemático (Matlab®) | Medición experimental | Error (%) |
|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------|
| Distancia (km) | 63.43 | 63.30 | 0.20 |
| Energía de descarga (kWh) | 13.74 | 12.50 | 9.94 |
| Energía de carga (kWh) | -4.91 | -4.70 | 4.42 |
| Energía neta consumida (kWh) | 8.83 | 7.80 | 13.27 |

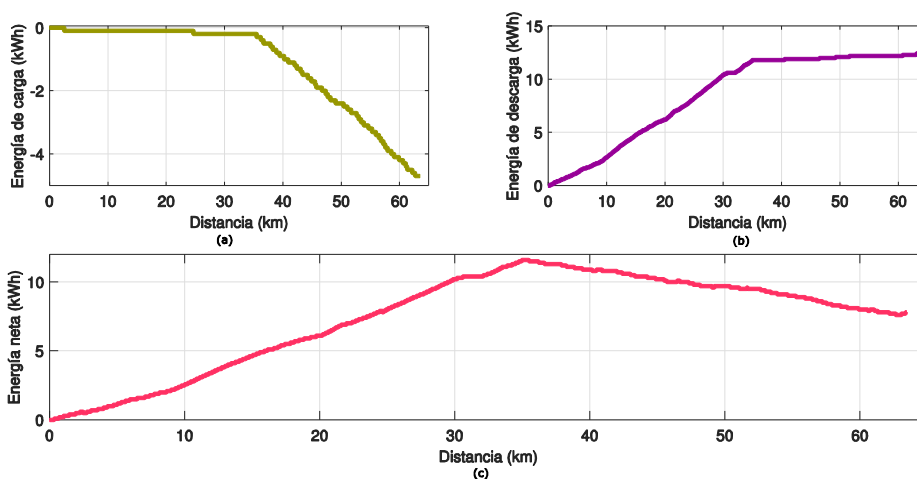


Figura 4.15: (a) Energía de carga (b) Energía de descarga y (c) Energía neta de la ruta 1 de ida.

Durante el retorno hacia Cuenca se observa un comportamiento similar al de ida (ver figura 4.16), debido a que el trayecto empieza con un ascenso que representa el 44 % del recorrido y es en donde se presenta la mayor descarga de la batería, mientras que el recorrido restante se realiza en descenso y es en donde existe un mayor aporte del sistema de frenado regenerativo.

Durante el tramo en ascenso se presenta el mayor consumo de energía de descarga con un valor de 10.70 kWh, equivalente al 83.5 % del total de la energía de descarga del recorrido, mientras que la energía de carga representa el 4.65 % del total de la energía de carga, equivalente a -0.20 kWh.

En el recorrido en descenso, la batería de alto voltaje del VE es recargada con -4.10 kWh debido al aporte del sistema de frenado regenerativo y experimenta una descarga de 2.10 kWh.

Al final del recorrido de regreso, la energía acumulada de descarga es de 12.80 kWh, la energía de carga acumulada es -4.30 kWh y la energía neta consumida es 8.50 kWh, como se muestra en la tabla 4.9 y figura 4.16, con una tasa de consumo de 0.135 kWh/km, y un SoC final de 37.5 %, equivalente a 10.65 kWh de autonomía.

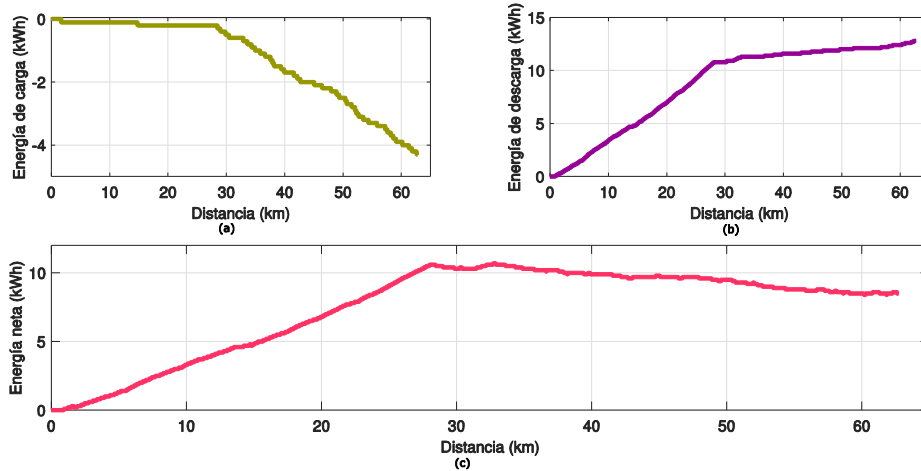


Figura 4.16: (a) Energía de carga (b) Energía de descarga y (c) Energía neta de la ruta 1 de regreso

Tabla 4.9: Porcentaje de error relativo en la ruta 1 de regreso.

| | Modelo matemático (Matlab®) | Medición experimental | Error (%) |
|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------|
| Distancia (km) | 62.70 | 62.60 | 0.17 |
| Energía de descarga (kWh) | 14.30 | 12.80 | 11.73 |
| Energía de carga (kWh) | -5.02 | -4.30 | 16.82 |
| Energía neta consumida (kWh) | 9.28 | 8.50 | 9.15 |

4.6.2. Ruta 2: Cuenca – Molleturo con masa adicional (200 kg)

El recorrido empieza en el Laboratorio de Microrred Eléctrica Campus – Balzay, con coordenadas (-2.891839575,-79.0385083) hasta 9.8 km antes de la entrada a la parroquia Molleturo, con coordenadas (-2.797529788,-79.34832294), como se muestra en la figura 4.17.



Figura 4.17: Mapa de la ruta 2: Cuenca - 9.8 km antes de la entrada a la parroquia Molleturo.

La velocidad máxima alcanzada durante el recorrido de ida fue de 89 km/h y al regreso fue de 105 km/h, siendo la velocidad promedio total del viaje de 58 km/h. En el recorrido, el SoC inicial del VE fue 95 % y el SoC final 33.5 %. La ruta se realizó con dos pasajeros con una masa promedio de 145 kg y una carga adicional con una masa promedio de 200 kg (ver figura 4.18).



Figura 4.18: VE con carga adicional de 200 kg.

En la figura 4.19 se presenta un perfil de elevación del recorrido, en donde el punto de inicio se encuentra a una altura de 2595 m.s.n.m. y el punto final a 3131 m.s.n.m., en donde el punto máximo alcanza los 4176 m.s.n.m. ubicado en el sector denominado "Mirador Tres Cruces", con coordenadas (-2.775910034,-79.246011364). La distancia entre el punto inicial y máximo es de 35.45 km, en

donde el diferencial de altura entre estos puntos es de $\Delta_h=1581$ m, con una pendiente de 44.59 m/km; mientras que la distancia entre el punto máximo y final es de 16.92 km, y el diferencial de altura es de $\Delta_h=1045$ m, con una pendiente de 61.76 m/km.

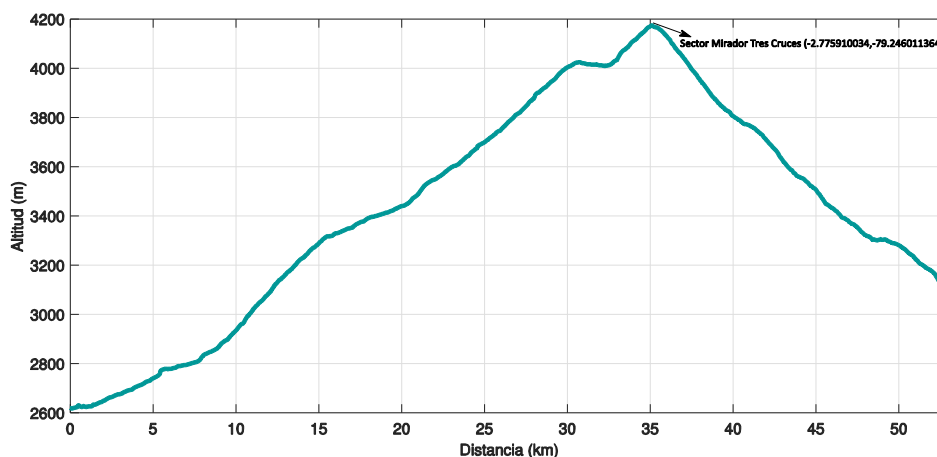


Figura 4.19: Perfil de elevación de la ruta 2: Cuenca - 9.8 km antes de la entrada a la parroquia Molleturo.

En las figuras 4.20 y 4.21 se observa que el comportamiento de la batería tanto para la energía acumulada de carga, descarga y energía neta de la ruta Cuenca – Molleturo con masa adicional es similar al de las figuras 4.15 y 4.16, que muestran los perfiles de energías de la ruta Cuenca – Molleturo sin carga adicional. Los valores de energía estimados mediante el modelo matemático y el consumo de energía real obtenido mediante el recorrido realizado se presentan en las tablas 4.10 y 4.11.

En el recorrido de ida se evidencia que durante el trayecto en ascenso existe una mayor descarga de la batería, ya que la energía de descarga es 14.60 kWh, la cual representa el 97.98 % de la energía total de descarga presentada en el trayecto, mientras que el porcentaje de energía regenerativa es 8.56 %, equivalente a -0.30 kWh. Por lo tanto, la energía neta consumida en este tramo en ascenso es 14.30 kWh. Por otra parte, durante el trayecto en descenso la energía de frenado regenerativo predomina con respecto a la energía de descarga, ya que durante este tramo es en donde se presenta el 91.44 % de la energía total recuperada, equivalente a -3.20 kWh, mientras que la energía de descarga consumida por la batería es 0.30 kWh.

Al final del recorrido de ida, la energía acumulada de descarga es 14.90 kWh, la energía de carga acumulada es -3.50 kWh y la energía neta consumida es 11.40 kWh, como se muestra en la figura 4.20 y tabla 4.10, con una tasa de consumo de 0.217 kWh/km, y un SoC final de 55.5 %, equivalente a 15.77 kWh de autonomía.

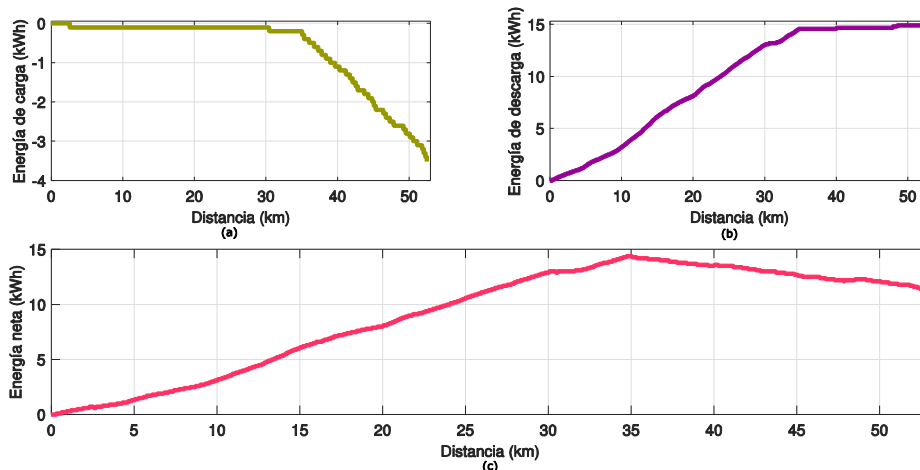


Figura 4.20: (a) Energía de carga (b) Energía de descarga y (c) Energía neta de la ruta 2 de ida.

Tabla 4.10: Porcentaje de error relativo en la ruta 2 de ida

| | Modelo matemático (Matlab®) | Medición experimental | Error (%) |
|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------|
| Distancia (km) | 52.46 | 52.38 | 0.16 |
| Energía de descarga (kWh) | 13.09 | 14.90 | 12.12 |
| Energía de carga (kWh) | -3.18 | -3.50 | 9.00 |
| Energía neta consumida (kWh) | 9.91 | 11.40 | 13.07 |

En el recorrido de regreso se observa que durante el ascenso se presenta un mayor consumo de energía (ver figura 4.21), con un valor de 8.20 kWh equivalente al 78 % del total de la energía de descarga del recorrido, mientras que la energía de carga representa el 4.34 % de la energía, equivalente a -0.20 kWh.

Durante el trayecto en descenso existe un mayor aporte del sistema de frenado regenerativo, por lo que la batería se carga -4.40 kWh y se descarga 2.30 kWh. Por lo tanto, al final del recorrido de regreso la energía acumulada de descarga es 10.50 kWh, la energía de carga acumulada es -4.60 kWh y la

energía neta consumida es 5.90 kWh, como se muestra en la figura 4.21 y tabla 4.11, con una tasa de consumo de 0.112 kWh/km, y un SoC final de 33.5 %, equivalente a 9.52 kWh de autonomía.

Tabla 4.11: Porcentaje de error relativo en la ruta 2 de regreso.

| | Modelo matemático (Matlab®) | Medición experimental | Error (%) |
|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------|
| Distancia (km) | 52.69 | 52.61 | 0.14 |
| Energía de descarga (kWh) | 10.85 | 10.50 | 3.34 |
| Energía de carga (kWh) | -5.13 | -4.60 | 11.63 |
| Energía neta consumida (kWh) | 5.72 | 5.90 | 3.11 |

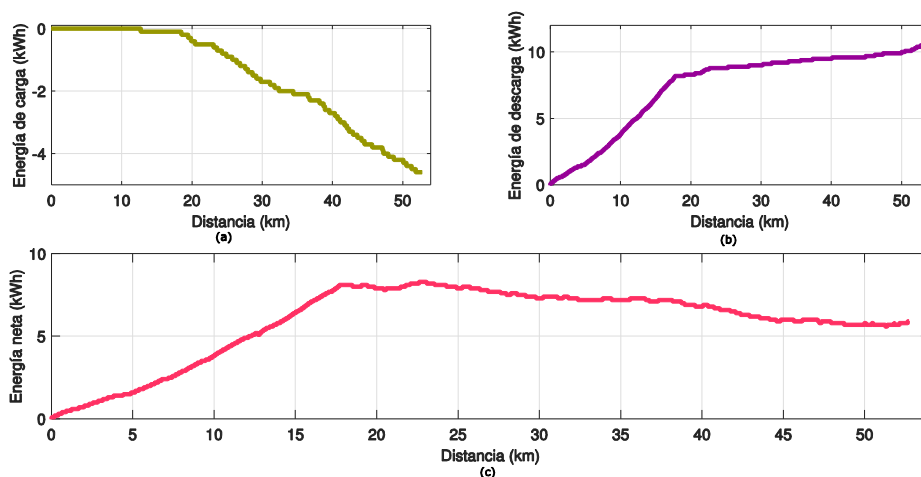


Figura 4.21: (a) Energía de carga (b) Energía de descarga y (c) Energía neta de la ruta 2 de regreso.

Para analizar los valores obtenidos en la ruta realizada con y sin masa adicional se recorta la ruta realizada sin equipaje adicional 9.8 km antes de la entrada a la parroquia Molleturo, con coordenadas (-2.797529788,-79.34832294), con la finalidad de que las dos rutas tengan el mismo punto inicial y final. En la tabla 4.12 se presentan los valores experimentales de energía de carga, descarga y energía neta de la ruta recortada sin masa adicional, tanto para el recorrido de ida como de regreso.

Tabla 4.12: Valores de energía de la ruta recortada Cuenca – Molleturo / sin masa adicional.

| | C - M | M - C |
|----------------------------------|-------|-------|
| Distancia (km) | 53.22 | 52.75 |
| Energía de descarga (kWh) | 12.20 | 9.40 |



| | | |
|-------------------------------------|-------|-------|
| Energía de carga (kWh) | -2.90 | -4.20 |
| Energía neta consumida (kWh) | 9.30 | 5.20 |

Al comparar los valores de las tablas 4.10, 4.11 y 4.12 se puede mencionar que en la ruta con carga adicional de 200 kg, la descarga de la batería incrementa 2.70 kWh en el trayecto de ida y 1.10 kWh en el trayecto de regreso, debido a que al aumentar la masa del VE aumenta la inercia de este, por lo tanto, el motor eléctrico necesita realizar un mayor trabajo para impulsar el VE, lo que se refleja en un mayor consumo de energía. Asimismo, la energía de carga en la ruta con masa adicional tiene un incremento de 0.60 kWh en el recorrido de ida y 0.40 kWh en el recorrido de regreso, debido al aporte que existe desde el sistema de frenado regenerativo, en el cual interviene el motor eléctrico y el pedal de freno para disminuir la velocidad del VE; sin embargo, el valor del aporte energético de este sistema está condicionado por el sistema de control de freno, estilo de conducción (velocidad) y masa del vehículo (inercia).

4.6.3. Ruta 3: Cuenca – Cañar

El recorrido se realiza desde el Laboratorio de Microrred Eléctrica Campus – Balzay, con coordenadas (-2.891839575,-79.0385083) hasta 14.2 km antes de la ciudad de Cañar, con coordenadas (-2.638712884, -78.91539908). En el recorrido, el SoC inicial del VE fue 95 % y el SoC final 32 %. La velocidad máxima alcanzada durante la ruta de ida fue de 114 km/h y al regreso fue de 91.24 km/h, siendo la velocidad promedio total del viaje de 46.55 km/h. La ruta se realizó con dos pasajeros con una masa promedio de 145 kg.

En la figura 4.22 se observa el recorrido realizado desde el Laboratorio de Microrred Eléctrica Campus – Balzay por la carretera Troncal de la Sierra E35 hasta llegar a Biblián, en donde comienza el ascenso de la ruta por la carretera Transversal Austral E35/E40, la cual se caracteriza por ser una zona montañosa, con clima de páramo. El estado de la red vial hacia Biblián es bueno, mientras que a partir de este punto la red vial presenta hundimientos e inconvenientes en la calzada.

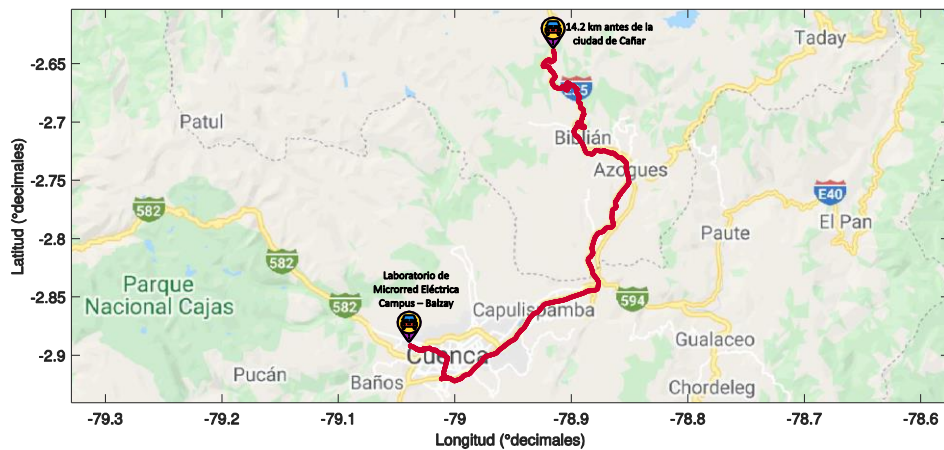


Figura 4.22: Mapa de la ruta 3: Cuenca - 14.2 km antes de la ciudad de Cañar.

El recorrido presenta un perfil de elevación como se muestra en la figura 4.23, donde el punto de inicio se encuentra a una altura de 2595 m.s.n.m., el punto más bajo se encuentra a 2337 m.s.n.m. en la vía Cuenca-Azogues en el intercambiador de Guangarcucho, con coordenadas (-2.843922889; -78.87911899) y el punto final se encuentra a 3437 m.s.n.m., el cual es el punto máximo del recorrido. La distancia entre el punto inicial y final es de 61.13 km, en donde el diferencial de altura entre estos puntos es de $\Delta h=842$ m, con una pendiente de 13.77 m/km.

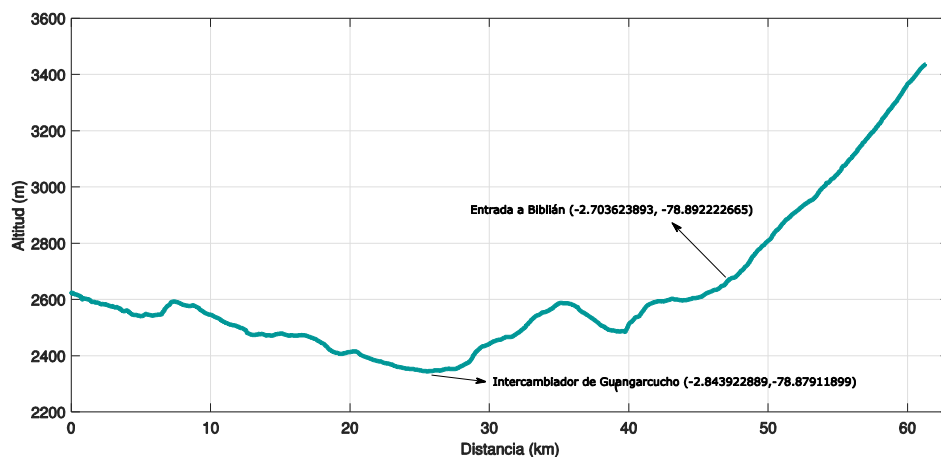


Figura 4.23: Perfil de elevación de la ruta 3: Cuenca - 14.2 km antes de la ciudad de Cañar.

En la figura 4.24 se observa el comportamiento del perfil de energía de carga, descarga y energía neta consumida durante el recorrido de ida. En esta figura se evidencia que la energía de descarga de la batería tiene un crecimiento lento durante los primeros 25.50 km que se realizan en descenso con una descarga

de 3.70 kWh; a partir de este punto empieza el ascenso hacia la ciudad de Cañar, por lo que la energía de descarga de la batería aumenta hasta el valor de 15.60 kWh. En lo que respecta a la carga de la batería, se observa que el mayor aporte del sistema de frenado regenerativo se da durante los primeros 25.50 km en descenso del recorrido, con un 59.08 % del total de la energía recuperada equivalente a -1.30 kWh; a partir de este punto, en los 35.63 km de recorrido restantes en ascenso, se tiene un aporte de -0.90 kWh, obteniendo un total de -2.20 kWh de energía recuperada en el recorrido de ida. Por lo tanto, la energía neta consumida por la batería de alto voltaje del VE durante el recorrido es de 13.40 kWh, con una tasa de consumo de 0.219 kWh, presentando un crecimiento semiparabólico.

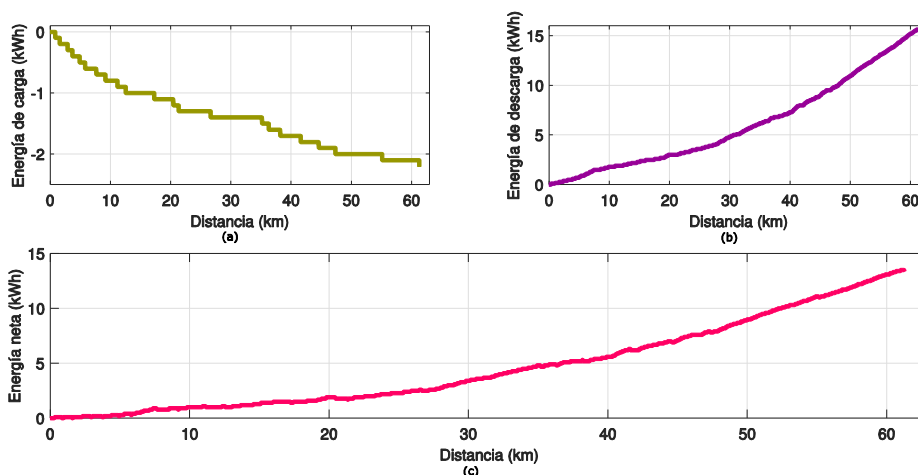


Figura 4.24: (a) Energía de carga (b) Energía de descarga y (c) Energía neta de la ruta 3 de ida.

En la tabla 4.13 se presentan los valores finales de energía obtenidos durante el recorrido realizado, así como los valores simulados mediante el modelo matemático.

Tabla 4.13: Porcentaje de error relativo en la ruta 3 de ida.

| | Modelo matemático (Matlab®) | Medición experimental | Error (%) |
|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------|
| Distancia (km) | 61.25 | 61.13 | 0.20 |
| Energía de descarga (kWh) | 13.34 | 15.60 | 14.50 |
| Energía de carga (kWh) | -2.60 | -2.20 | 18.39 |
| Energía neta consumida (kWh) | 10.73 | 13.40 | 19.90 |

En la figura 4.25 se presenta el perfil de comportamiento de energía de carga, descarga y energía neta consumida por la batería de alto voltaje durante el recorrido de regreso, en el cual se observa que existe similitud con el recorrido de ida. Al analizar el comportamiento de la energía de descarga se observa que existe una disminución del 56.05 % respecto al recorrido de ida, debido a que la mayor parte del recorrido se realiza en descenso, por lo que el motor eléctrico realiza un menor trabajo para impulsar el VE, lo que se refleja en un menor consumo de energía de la batería, teniendo una descarga total de 8.90 kWh. La energía de carga de la batería tiene su mayor aporte de energía de -3.10 kWh durante los 36.024 km de descenso hasta el punto más bajo del recorrido, en el intercambiador de Guangarcucho; a partir desde esta ubicación hasta el punto final del recorrido, la energía de carga experimenta un incremento de -1.30 kWh, dando una energía de carga final de -4.40 kWh.

La energía neta consumida se muestra en la figura 4.25 (c), en donde se aprecia que el vehículo, durante los primeros 36.024 km de recorrido, se encuentra con un mayor aporte de energía de carga; y en el recorrido restante, el vehículo experimenta una mayor tasa de descarga de la batería que la de carga, teniendo un consumo final de -4.50 kWh durante todo el recorrido y un estado SoC final 32 %, equivalente a 9.09 kWh de autonomía.

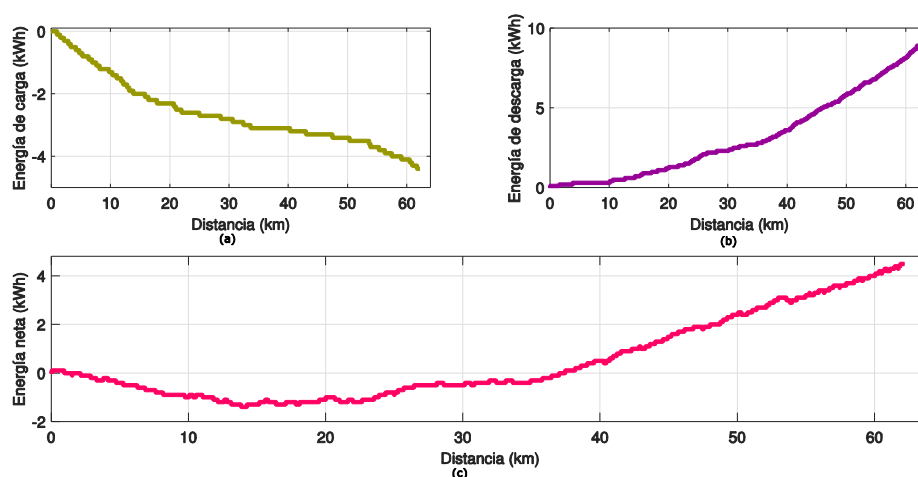


Figura 4.25: (a) Energía de carga (b) Energía de descarga y (c) Energía neta de la ruta 3 de regreso.

En la tabla 4.14 se presentan los valores finales de energía obtenidos durante el recorrido realizado, así como los valores simulados mediante el modelo matemático.

Tabla 4.14: Porcentaje de error relativo en la ruta 3 de regreso.

| | Modelo matemático (Matlab®) | Medición experimental | Error (%) |
|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------|
| Distancia (km) | 62.15 | 62.02 | 0.21 |
| Energía de descarga (kWh) | 8.95 | 8.90 | 0.62 |
| Energía de carga (kWh) | -4.11 | -4.40 | 6.53 |
| Energía neta consumida (kWh) | 4.84 | 4.50 | 7.61 |

4.6.4. Ruta 4: Cuenca – Cañar ruta con masa adicional (200 kg)

El recorrido inicia en el Laboratorio de Microrred Eléctrica Campus – Balzay, con coordenadas (-2.891839575,-79.0385083) hasta la estación de servicio PetroEcuador Cumbre Andina, con coordenadas (-2.614159586,-78.91327421), la cual se encuentra a 11 km de la ciudad de Cañar, como se muestra en la figura 4.26.



Figura 4.26: Mapa de la ruta 4: Cuenca - estación de servicio PetroEcuador Cumbre Andina.

La velocidad máxima alcanzada durante la ruta de ida fue de 112 km/h y al regreso fue de 111.42 km/h, siendo la velocidad promedio total del viaje de 65.56 km/h. En el recorrido, el SoC inicial del VE fue 94.5 % y el SoC final 24 %. La ruta se realizó con dos pasajeros con una masa promedio de 145 kg y una carga adicional con una masa promedio de 200 kg.

El perfil de elevación del recorrido realizado se muestra en la figura 4.27, donde el punto de inicio se encuentra a una altura de 2595 m.s.n.m., el punto final a 3540 m.s.n.m., el cual es el punto máximo del recorrido y el punto más bajo se encuentra a 2337 m.s.n.m. en el intercambiador de Guangarcucho, con coordenadas (-2.843922889, -78.87911899). La distancia entre el punto inicial y final es de 63.69 km, en donde el diferencial de altura entre estos puntos es de $\Delta h=945$ m, con una pendiente de 14.83 m/km.

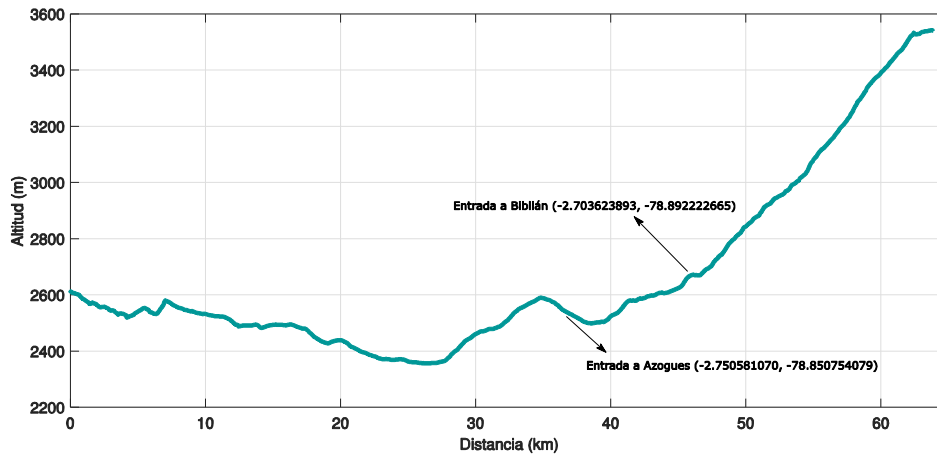


Figura 4.27: Perfil de elevación de la ruta 4: Cuenca – estación de servicio PetroEcuador Cumbre Andina.

En la figura 4.28, se presenta el perfil de comportamiento de energías de carga, descarga y energía neta consumida durante el recorrido hacia Cañar, en donde se observa que durante los primeros 37 km, la curva semiparabólica de la energía neta presenta un crecimiento lento debido a que este trayecto no presenta demasiadas variaciones de altura, al tratarse de un recorrido en descenso con una pendiente relativamente pequeña, por lo que hasta este punto la energía de descarga es el 40 % del total que se presenta durante todo el recorrido, equivalente a 7.00 kWh; mientras que la energía de carga es del 67.99 % del total, equivalente a -1.70 kWh. Por lo tanto, la energía neta consumida hasta este punto es de 5.30 kWh. A partir de este punto se presenta un ascenso hacia Cañar con una pendiente de 39.06 m/km, por lo que la tasa de descarga de la batería aumenta presentando un incremento de 10.50 kWh, mientras que el aporte del sistema de frenado regenerativo se reduce a -0.80 kWh. Los valores totales de energía de carga, descarga y energía neta consumida obtenidos durante el recorrido de ida se presentan en la tabla 4.15, junto con los valores

calculados mediante el modelo matemático, así como los porcentajes de error relativo, los cuales se encuentran dentro del límite admisible propuesto en el estudio.

Tabla 4.15: Porcentaje de error relativo en la ruta 4 de ida.

| | Modelo matemático (Matlab®) | Medición experimental | Error (%) |
|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------|
| Distancia (km) | 63.85 | 63.70 | 0.24 |
| Energía de descarga (kWh) | 16.23 | 17.50 | 7.27 |
| Energía de carga (kWh) | -2.63 | -2.50 | 5.03 |
| Energía neta consumida (kWh) | 13.60 | 15.00 | 9.32 |

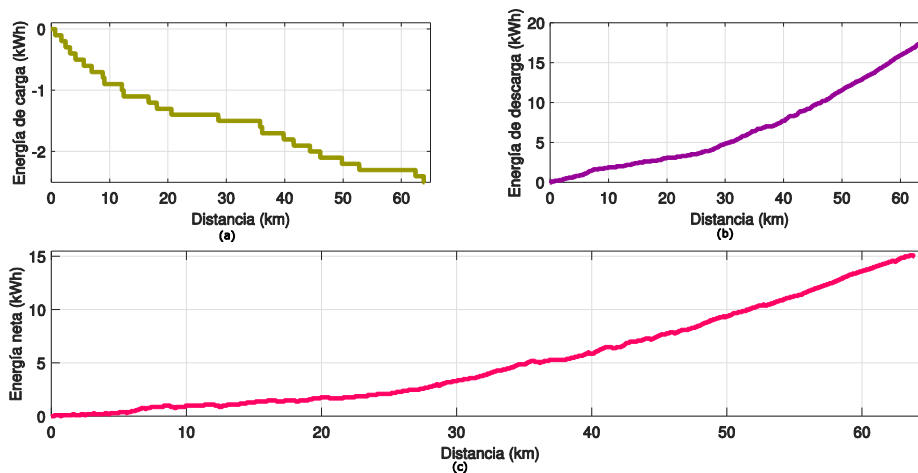


Figura 4.28: (a) Energía de carga (b) Energía de descarga y (c) Energía neta de la ruta 4 de ida.

En la figura 4.29 se observa que en los primeros 40 km de recorrido la tasa de energía de carga es mayor a la descarga, por lo que la energía neta consumida es negativa, esto se debe a que durante este tramo se realiza un descenso leve con una pendiente de 29.22 m/km, teniendo en este punto un valor de energía de carga de -4.90 kWh, de descarga de 4.90 kWh y de energía neta consumida de 0 kWh. A partir de este punto empieza un ligero ascenso hasta el Laboratorio de Microrred Eléctrica Campus – Balzay, en donde la tasa de descarga aumenta, lo que se refleja en el incremento de la pendiente de la figura 4.29 (b), a diferencia del perfil de energía de carga en donde la pendiente disminuye, teniendo un crecimiento más bajo de energía. Por lo tanto, la energía total de carga recuperada durante todo el recorrido es de -6.50 kWh, mientras que la de descarga 11.20 kWh, teniendo una energía neta consumida de 4.70

kWh, como se observa en la tabla 4.16, en donde también se muestran los valores calculados a partir del modelo matemático y los porcentajes de error relativo, los cuales se encuentran dentro del límite admisible propuesto en el estudio.

Tabla 4.16: Porcentaje de error relativo en la ruta 4 de regreso.

| | Modelo matemático (Matlab®) | Medición experimental | Error (%) |
|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------|
| Distancia (km) | 62.96 | 62.78 | 0.29 |
| Energía de descarga (kWh) | 11.17 | 11.20 | 0.30 |
| Energía de carga (kWh) | -5.55 | -6.50 | 14.63 |
| Energía neta consumida (kWh) | 5.62 | 4.70 | 19.52 |

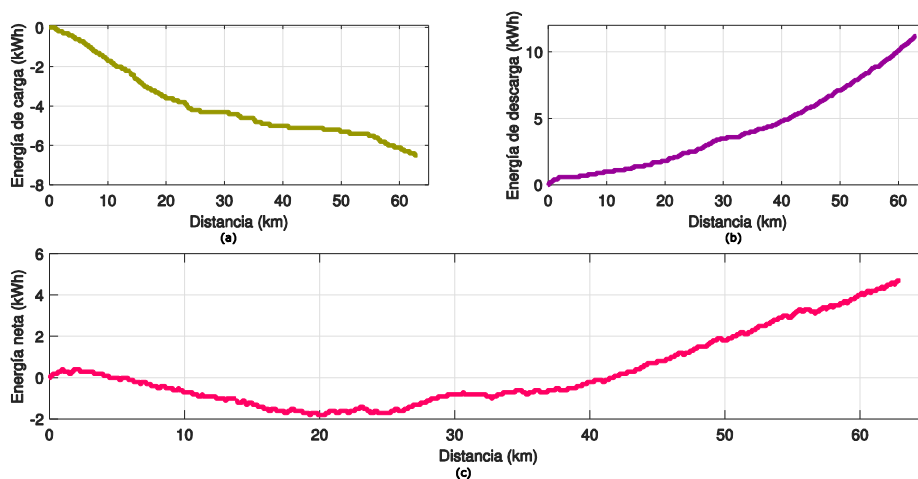


Figura 4.29: (a) Energía de carga (b) Energía de descarga y (c) Energía neta de la ruta 4 de regreso.

Para analizar los valores obtenidos en la ruta realizada con y sin masa adicional se recorta la ruta realizada con equipaje adicional 3 km antes de la estación de servicio PetroEcuador Cumbre Andina, con coordenadas (-2.634366428,-78.915535583), con la finalidad de que las dos rutas tengan el mismo punto inicial y final. En la tabla 4.17 se presentan los valores experimentales de energía de carga, descarga y energía neta de la ruta con una carga adicional de 200 kg, tanto para el recorrido de ida como de regreso.

Tabla 4.17: Valores de energía de la ruta recortada Cuenca - Cañar / con masa adicional.

| | C - Ca | Ca - C |
|-------------------------------------|---------------|---------------|
| Distancia (km) | 61.12 | 61.10 |
| Energía de descarga (kWh) | 16.50 | 10.70 |
| Energía de carga (kWh) | -2.30 | -6.30 |
| Energía neta consumida (kWh) | 14.20 | 4.40 |

Al analizar las rutas realizadas con y sin masa adicional de 200 kg (ver tabla 4.15, 4.16 y 4.17), se evidencia que al aumentar la masa existe un incremento de los valores de energía de descarga, carga y energía neta consumida en el recorrido. Estos incrementos se deben a que la masa adicional del equipaje aumenta la inercia del VE, además de que el motor necesita realizar un mayor trabajo para impulsar al VE, por lo tanto, necesita absorber mayor cantidad de energía para esto. Para el caso de la energía de carga, en el sistema de freno regenerativo se necesita aplicar una mayor fuerza por una cantidad mayor de tiempo y de espacio para disminuir la velocidad del vehículo. Además, la velocidad promedio de la ruta Cuenca – Cañar con masa extra es superior a la de la ruta realizada sin masa adicional, siendo la velocidad un factor que influye en mayor o menor medida en la autonomía del VE.

4.6.5. Ruta 5: Cuenca – Léntag

El recorrido empieza en el Laboratorio de Microrred Eléctrica Campus – Balzay, con coordenadas (-2.891839575,-79.0385083) hasta llegar a la entrada de la comunidad de Léntag, con coordenadas (-3.23653674,-79.22900808). La velocidad máxima alcanzada durante la ruta de ida fue de 117.38 km/h y al regreso fue de 115.28 km/h, siendo la velocidad promedio total del viaje de 54.68 km/h. En el recorrido, el SoC inicial del VE fue 92.5 % y el SoC final 35 %. La ruta se realizó con dos pasajeros con una masa promedio de 145 kg.

En la figura 4.30 se observa el recorrido realizado desde el Laboratorio de Microrred Eléctrica Campus – Balzay por la carretera Troncal de la Sierra E35 hasta el redondel de Cumbe, en donde continúa por la vía Colectora Cumbe-Y de Corralitos E59, la cual se caracteriza por ser una zona montañosa, con un

clima que varía desde tipo páramo a tropical. El estado de la red vial hacia Léntag es bueno.



Figura 4.30: Mapa de la ruta 5: Cuenca - entrada de la comunidad de Léntag.

El recorrido presenta un perfil de elevación como se muestra en la figura 4.31, donde el punto de inicio se encuentra a una altura de 2595 m.s.n.m. y el punto final a 1519 m.s.n.m., en donde el punto máximo alcanza los 2770 m.s.n.m., ubicado en el sector del Portete, con coordenadas (-3.110902823,-79.10858689). La distancia entre el punto inicial y máximo es de 31.19 km, en donde el diferencial de altura entre estos puntos es de $\Delta_h=175$ m, con una pendiente de 5.61 m/km; mientras que la distancia entre el punto máximo y final es de 27.12 km, y el diferencial de altura es de $\Delta_h=1251$ m, con una pendiente de 46.12 m/km.

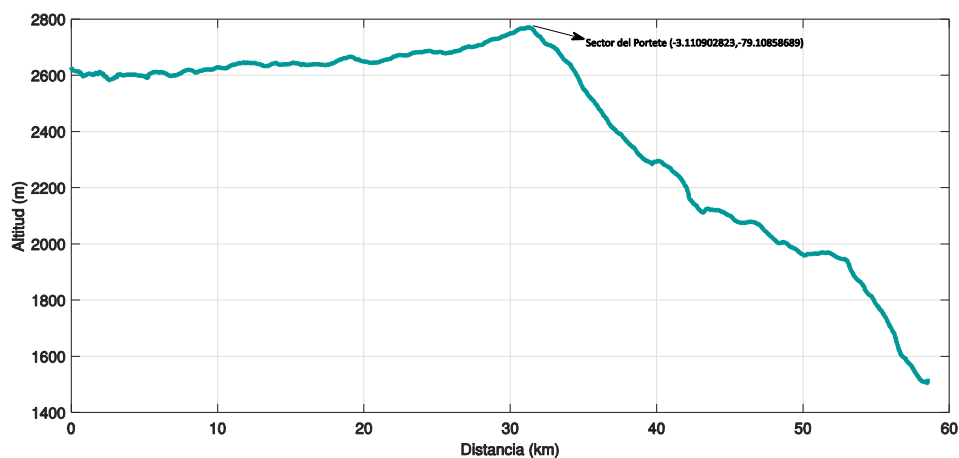


Figura 4.31: Perfil de elevación de la ruta 5: Cuenca - entrada de la comunidad de Léntag.

En la tabla 4.18 se observa que la energía de descarga es mayor a la energía de carga de la batería del VE durante el recorrido de ida, debido a que desde el

punto de partida hasta el punto máximo de altura (sector del Portete) el VE consume el 68.13 % de la energía total de descarga del recorrido, equivalente a 6.20 kWh. Además, en la figura 4.32 se observa que no existe una contribución significativa del sistema de frenado regenerativo hasta este sector, ya que la batería únicamente experimenta un aporte de -1.20 kWh, que representa el 23.8 % de la energía total de carga del trayecto de ida. El segundo tramo del recorrido se realiza en descenso con una pendiente de 46.12 m/km, de manera que aumenta la contribución de energía desde sistema de frenado regenerativo, en donde la batería de alto voltaje del VE tiene un incremento en su recarga de -3.80 kWh y de descarga 2.90 kWh.

Al final del recorrido de ida, se observa en la figura 4.32 y tabla 4.18 que la energía de carga acumulada es -5.00 kWh, la energía de descarga acumulada es 9.10 kWh y la energía neta consumida es 4.10 kWh, con una tasa de consumo de 0.0703 kWh/km, siendo el SoC final del VE 79 %, equivalente a 22.41 kWh de autonomía.

Tabla 4.18: Porcentaje de error relativo en la ruta 5 de ida.

| | Modelo matemático (Matlab®) | Medición experimental | Error (%) |
|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------|
| Distancia (km) | 58.51 | 58.32 | 0.32 |
| Energía de descarga (kWh) | 8.72 | 9.10 | 4.16 |
| Energía de carga (kWh) | -4.58 | -5.00 | 8.38 |
| Energía neta consumida (kWh) | 4.14 | 4.10 | 0.99 |

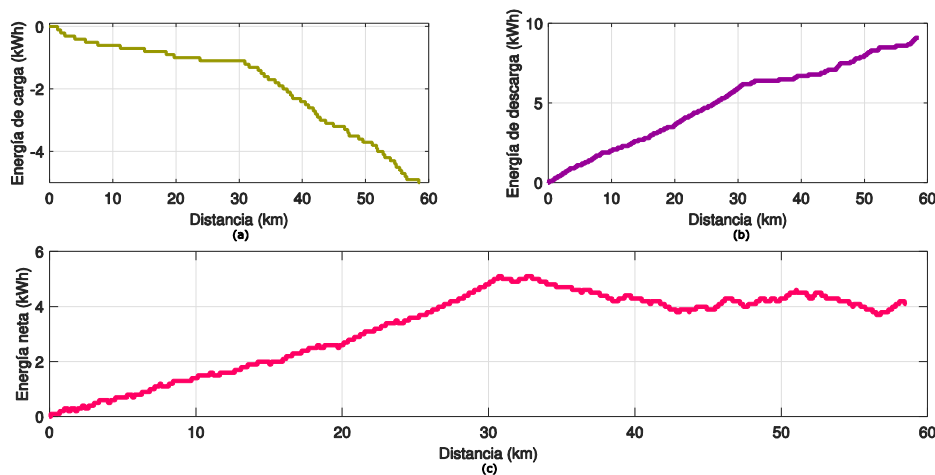


Figura 4.32: (a) Energía de carga (b) Energía de descarga y (c) Energía neta de la ruta 5 de ida.

En la tabla 4.19 se observa que en el recorrido de retorno hacia Cuenca existe una mayor descarga de la batería de alto voltaje, debido a que el VE tiene que realizar un ascenso más pronunciado, con una pendiente de 46.12 m/km, respecto al recorrido de ida, por lo que batería del VE se descarga 10.30 kWh y se recarga -1.00 kWh durante este ascenso hacia el sector del Portete, como se observa en la figura 4.33.

Durante la segunda parte de este trayecto se presenta un leve descenso, en donde la batería presenta un incremento en la descarga de 5.80 kWh y de carga -2.60 kWh debido al aporte del sistema de frenado regenerativo; por lo que al final del recorrido de regreso la energía acumulada de descarga es 16.10 kWh, la energía de carga acumulada es -3.60 kWh y la energía neta consumida es 12.50 kWh, como se muestra en la figura 4.33 y tabla 4.19, con una tasa de consumo de 0.20 kWh/km, y un SoC final de 35 %, equivalente a 9.94 kWh de autonomía.

Tabla 4.19: Porcentaje de error relativo en la ruta 5 de regreso.

| | Modelo matemático (Matlab®) | Medición experimental | Error (%) |
|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------|
| Distancia (km) | 62.67 | 62.43 | 0.39 |
| Energía de descarga (kWh) | 16.61 | 16.10 | 3.19 |
| Energía de carga (kWh) | -3.40 | -3.60 | 5.56 |
| Energía neta consumida (kWh) | 13.21 | 12.50 | 5.71 |

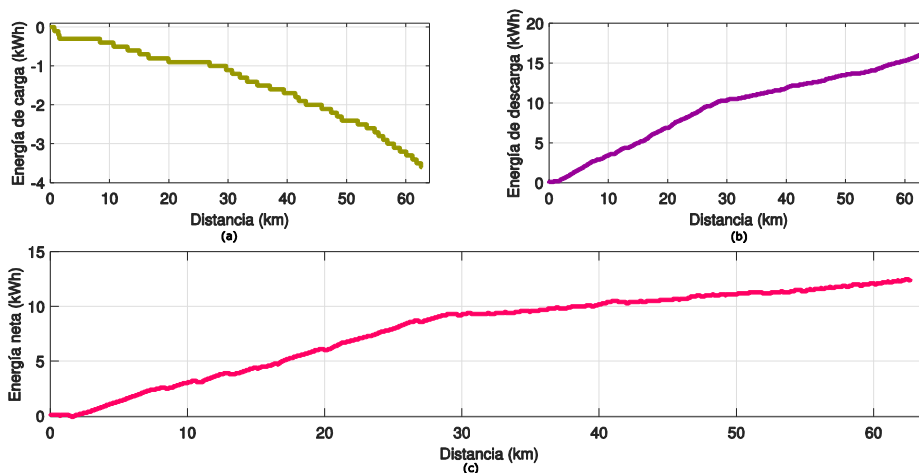


Figura 4.33: (a) Energía de carga (b) Energía de descarga y (c) Energía neta de la ruta 5 de regreso.



4.7. Conclusiones

Se desarrolló una metodología para estimar el consumo energético de un VE, mediante un proceso de adquisición de datos en campo y el modelo matemático, el cual fue calibrado mediante la experimentación en cuatro rutas de prueba en un radio de 4 km alrededor del Laboratorio de Microrred Eléctrica Campus – Balzay. Posteriormente el modelo fue probado y validado mediante cinco rutas de prueba en tres vías interprovinciales, obteniendo un resultado exitoso en cada una de las simulaciones, ya que el mayor error relativo que se obtuvo es 19.90 % con respecto a la energía neta de la batería en la ruta Cuenca – Cañar; además, los errores relativos promedio son 0.21 % para la distancia total de viaje, 6.10 % para la energía de descarga, 9.12 % para la energía de carga y 9.24 % para la energía neta consumida. Estos valores de error son aceptables teniendo en consideración el tipo de modelo “cuasi-estacionario hacia atrás” implementado, la precisión de los equipos empleados en la adquisición de datos y la aleatoriedad de cada una de las condiciones bajo las que se desarrollaron las rutas, como son: climáticas, topográficas, estilo de conducción, estado de la carretera, tráfico y de equipaje.

Del análisis realizado en cada una de las rutas con y sin masa adicional se puede mencionar que el consumo de energía del VE aumenta cuando el viaje se realiza con carga adicional, ya que a mayor masa existe mayor inercia, por lo que el motor eléctrico necesita realizar un mayor trabajo para impulsar el VE, lo que representa una mayor descarga de la batería de alto voltaje del vehículo; sin embargo en los tramos en los que el vehículo desciende, el equipaje adicional resulta relativamente beneficioso ya que se debe aplicar una mayor fuerza de frenado para reducir la velocidad del VE, lo cual contribuye a recuperar una mayor cantidad de energía cinética, lo que se refleja en una mayor tasa de energía de carga de la batería; esta energía depende del sistema de control de freno y de la eficiencia del sistema de frenado regenerativo.

Finalmente, se puede mencionar que el modelo matemático implementado se puede utilizar de manera confiable en la ruta de estudio Cuenca – Guayaquil vía E582, ya que se realizaron cinco rutas de validación, de las cuales dos de ellas



se llevaron a cabo en la vía Cuenca – El Cajas – Molleturo, bajo dos escenarios:
con y sin carga adicional, obteniendo errores relativos menores al 17 %.



Capítulo 5. Metodología para seleccionar la ubicación de estaciones de carga rápida, caso de estudio: ruta Cuenca - Guayaquil

5.1. Introducción

En la actualidad, el uso de los VE se presenta como parte de la solución frente a la contaminación atmosférica, contaminación auditiva, agotamiento de recursos no renovables, volatilidad del precio de los combustibles, entre otros factores; los cuales se intensifican con el rápido desarrollo de la civilización y el auge de la industria automotriz. Varios países alrededor del mundo promueven el uso de estos vehículos, ya que además de hacer frente a los problemas mencionados anteriormente, se espera que proporcionen un transporte más eficiente y sostenible en el futuro cercano [119]. También es importante mencionar que la introducción de esta tecnología vehicular debe ir de la mano de una *alfabetización tecnológica*, que permita al usuario y potencial usuario entender todas las condiciones que afectan o garantizan un alto grado de eficiencia energética del VE, así como sus limitaciones y ventajas.

En el artículo “Barriers to widespread adoption of electric vehicles: An analysis of consumer attitudes and perceptions” [120], se analizan las barreras socio-técnicas para la adopción de VE mediante una encuesta llevada a cabo en la Universidad de Missouri, en donde se identifica que las preocupaciones principales por los potenciales compradores de estos vehículos son: la autonomía del vehículo, el costo y la disponibilidad continua de infraestructura de carga en carretera, generando en el usuario “ansiedad de autonomía”. Estas preocupaciones convergen en las siguientes preguntas: ¿tengo suficiente carga para llegar a mi destino y tengo suficiente carga para regresar?, ¿cuántas veces tendré que recargar mi vehículo y cuánto costará? [121].

Por otra parte, en la investigación “Addressing electric vehicle (EV) sales and range anxiety through parking layout, policy and regulation” [121], se demuestra que la confianza de un usuario o potencial comprador de un VE aumenta a medida que se implementan estaciones de carga para vehículos eléctricos (EVCS, por sus siglas en inglés); es decir, que estas no solo funcionan como un suministro de energía eléctrica, sino que también promueven la adopción de VE.



Es por esto que junto con la implementación de estos vehículos es necesaria la construcción de las estaciones de carga para garantizar el desarrollo sinérgico de esta tecnología [119].

En este contexto, las estaciones de carga son esenciales para garantizar el funcionamiento normal de los VE, por lo que es importante la selección adecuada de la ubicación de estas estaciones, siendo este punto uno de los más críticos en los que las empresas privadas y gobierno nacional deben centrar sus esfuerzos, ya que una correcta selección del sitio contribuye a maximizar la usabilidad de las estaciones, minimizar los costos operativos y de mantenimiento, y por ende maximizar las utilidades [122]. En este aspecto, varios estudios alrededor del mundo proponen diversos modelos y técnicas para la ubicación y tamaño óptimo de las estaciones de carga en ciudades, los cuales se basan en un análisis multicriterio de los factores que influyen en la selección de la ubicación de estaciones de carga, así como el análisis de criterios cuantitativos y cualitativos involucrados en la toma de decisión.

En el estudio “Planning Minimum Interurban Fast Charging Infrastructure for Electric Vehicles: Methodology and Application to Spain”, se estima la distancia óptima que debería existir entre EVCS en las principales vías de España, la cual varía entre 61.5 km y 67.75 km, estos valores fueron obtenidos mediante un modelo matemático que considera la autonomía y velocidad promedio de los vehículos, y condiciones climáticas y topográficas [123]. Adicionalmente, en el documento “Global EV Outlook 2018”, se menciona que la distancia promedio entre EVCS en carreteras puede variar entre 45 km y 115 km, de un país a otro [124].

En el contexto local no existe una contabilización exacta del número de estaciones de carga de vehículos eléctricos, pero se estiman que hay aproximadamente 40 estaciones en el país, entre estaciones de carácter público y privado [5] [125], las cuales están distribuidas en las ciudades de Quito, Guayaquil, Ambato, Cuenca, Santa Rosa y Loja, más no en vías interprovinciales. Este inconveniente se debe principalmente a la falta de estudios y financiamiento sobre un plan estratégico para la ubicación de



estructuras de carga en rutas interprovinciales y/o intercantonales, ya que durante la revisión de literatura de este capítulo no se ha encontrado ningún documento o artículo en el contexto local, quizás por la falta de interés de las empresas eléctricas, industria automotriz, la academia o la ciudadanía en general.

Es así que en este capítulo se presenta una metodología para la ubicación de estaciones de carga rápida en la ruta interprovincial Cuenca – Guayaquil vía E582, en donde se emplea el modelo matemático implementado en el capítulo 4 para obtener las ubicaciones en función del consumo energético del VE, y se analizan los diversos factores y criterios en base al contexto local que influyen en la selección de estas ubicaciones. Esta metodología se realiza buscando marcar un camino en el desarrollo de esta tecnología vehicular en el país.

5.2. Metodología

La metodología propuesta intenta resolver el problema que supone dónde ubicar la infraestructura de recarga rápida de VE en vías de primer y segundo orden que conecten las diferentes ciudades del país. Sin embargo, es importante entender que con base en la experiencia internacional de otros países, como primera etapa a la introducción de esta tecnología vehicular, se debe realizar una correcta cobertura de red de cargadores dentro de las ciudades para incentivar el uso de los VE y aumentar la confianza de los usuarios y potenciales compradores. Durante este proceso se creará una necesidad en los usuarios de querer realizar viajes de largas distancias, por lo que se tendrá que iniciar un proceso de despliegue de infraestructura de carga rápida a lo largo de las principales carreteras, etapa en la cual este estudio podrá usarse como base para una estimación de las posibles ubicaciones de las EVCS.

El presente capítulo se ha desarrollado en función de la información disponible de los diferentes sitios web de algunas entidades públicas y privadas del país, así como de herramientas de geolocalización y del modelo matemático propuesto en este estudio, además de artículos científicos, todos como elemento clave para la ubicación de estaciones de carga.



El procedimiento de esta metodología consiste en estudiar las condiciones de funcionamiento (SoC y autonomía) del VE empleado en este trabajo, así como establecer factores (geográficos, eléctricos, ambientales, sociales, económicos y de simulación) y criterios que influyen en la ubicación de estaciones de carga rápida en la ruta de estudio, los cuales se utilizan para analizar la viabilidad de implementar las estaciones en estos sitios. Además, se establecen los rangos de evaluación de estos criterios, en función de la importancia relativa que tienen cada uno de estos en el estudio. Después, se realiza una caracterización de la ruta de estudio en cuanto a factores ambientales, eléctricos, estado de la red vial, longitud del recorrido, entre otros, como un análisis preliminar para determinar las condiciones a las cuales está sujeta la ruta de estudio. Además, se investiga sobre el panorama de VE en el mercado nacional con el objetivo de identificar las tendencias en cuanto a la infraestructura de carga necesaria en función de las marcas y modelos de VE comercializados en el país, así como las autonomías, capacidad de las baterías de alto voltaje y tipos de conectores para la recarga de estos vehículos.

Posteriormente, se define el tipo de estación de carga según el modelo de negocio, uso y tipo de carga (lenta, semi-rápida, rápida), de acuerdo a las necesidades del caso de estudio, y se definen los requisitos generales que debe cumplir la estación en base a las características eléctricas y ambientales de la zona en donde se ubicará la estación.

Para determinar los puntos de ubicación de las EVCS se emplea el modelo matemático, el cual permite estimar el consumo energético del VE en todo el recorrido, tanto en la ruta de ida como de regreso. A partir de los resultados obtenidos se procede a identificar los puntos de la ruta en los cuales el VE necesita realizar los procesos de recarga, buscando garantizar el mínimo número de estaciones de carga necesarias para que el vehículo alcance su destino final, teniendo en cuenta las condiciones iniciales en las que realiza el recorrido, estado de carga y la capacidad de la batería del VE.

A partir de las condiciones iniciales planteadas, se realiza un nuevo proceso de simulación para definir un escenario base con las ubicaciones obtenidas;



estas ubicaciones se analizan y ponderan en base al factor geográfico y de carretera, y factor ambiental, para los cuales se han establecido un porcentaje mínimo de cumplimiento en su evaluación, teniendo en cuenta que son criterios decisivos para garantizar el posible emplazamiento de las estaciones de carga en cada uno de los sitios obtenidos en este escenario. En caso de que cada una de las ubicaciones cumpla con este factor, se procede a realizar la evaluación y análisis de los factores restantes propuestos en el estudio, los cuales permiten conocer el porcentaje de viabilidad de implementación de la estación en cada uno de los sitios de este escenario. Por otra parte, en caso de que el factor geográfico y de carretera o el factor ambiental no cumpla con la evaluación mínima requerida, y/o que en el análisis de caracterización de la ruta se hayan identificado sitios con mayores prestaciones, se procede a reubicar las estaciones mediante nuevos escenarios, teniendo en cuenta diferentes condiciones iniciales, buscando siempre que el vehículo alcance su destino final sin comprometer la autonomía del mismo, comprobando esto mediante las simulaciones de cada escenario. Además, se debe analizar y evaluar cada uno de los nuevos escenarios mediante los factores y criterios propuestos, siguiendo la misma secuencia explicada anteriormente.

Finalmente, se analiza los resultados obtenidos de cada escenario, se seleccionan los escenarios que tengan mejores prestaciones con base en la evaluación realizada y se presenta un mapa con las ubicaciones finales de las EVCS. En caso de que no se pueda establecer un escenario con ubicaciones que permitan realizar la instalación de las estaciones de carga rápida, se determina que la ruta de estudio actualmente no es viable para la implementación de la infraestructura de recarga de VE y se debe buscar otras rutas alternativas. Si dos o más escenarios llegasen a presentar la misma ponderación, se debe agregar nuevos factores o criterios más detallados para realizar una nueva evaluación de cada uno de los escenarios involucrados, a fin de identificar el mejor escenario para la implementación de la infraestructura de carga para VE.

A continuación, en la figura 5.1 se muestra el diagrama de flujo con el proceso empleado para la selección de la ubicación de las estaciones de carga de VE.

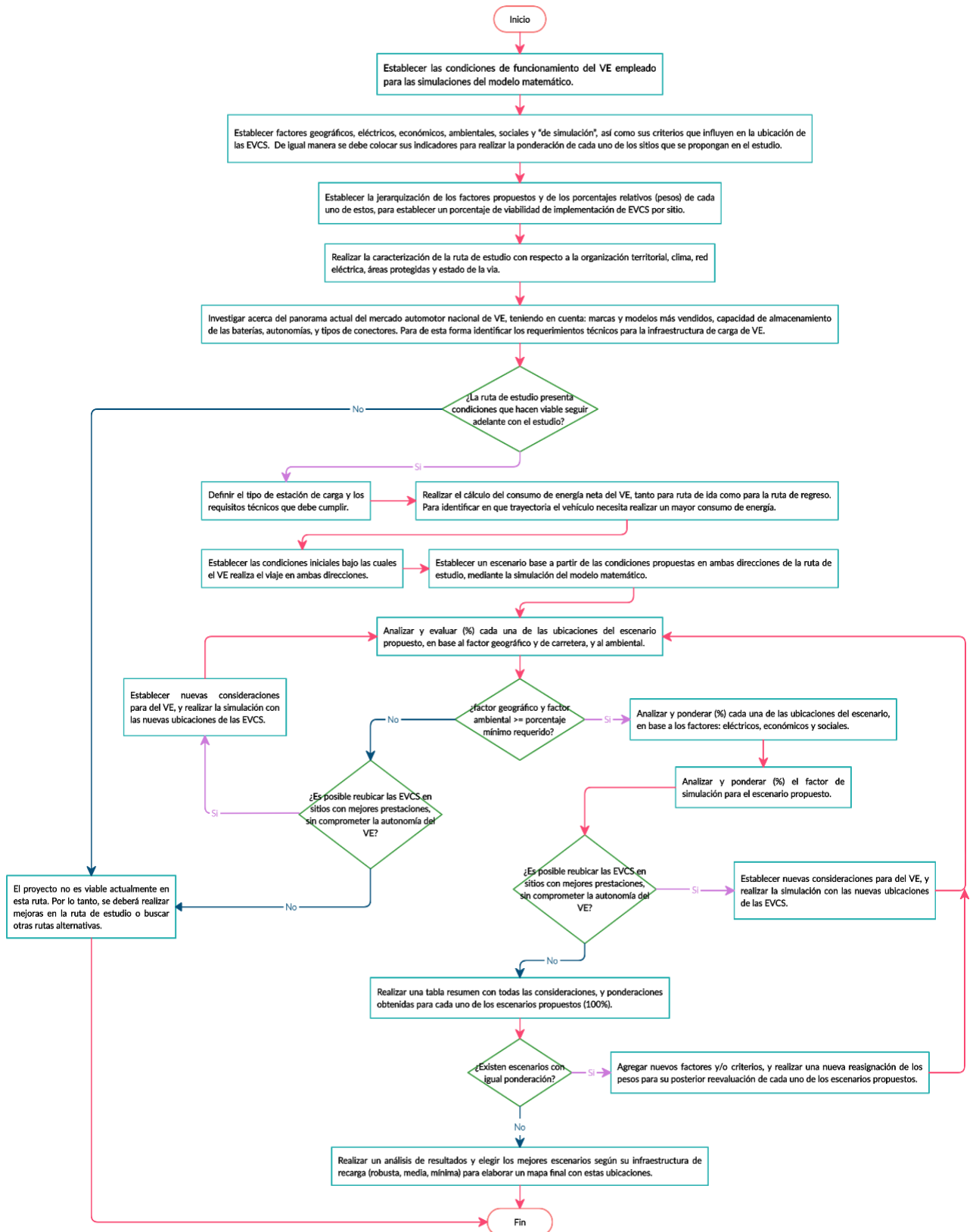


Figura 5.1: Diagrama de flujo para la ubicación de la EVCS.

5.3. Desarrollo de la metodología

5.3.1. Paso 1 – Estudio de las condiciones de funcionamiento del Kia Soul EV, con capacidad de almacenamiento de energía de 27 kWh

Los VE poseen una capacidad de almacenamiento de energía en sus baterías ($Capacidad_{batería_kWh}$), de la cual solo se puede utilizar un determinado porcentaje ya que se debe mantener un $SoC_{mínimo}$ de descarga para conservar la vida útil de la batería, que en el caso del Kia Soul se recomienda sea del 15 %. Por otra parte, cuando este modelo de VE realiza un proceso de recarga con una EVCS rápida, alcanza un SoC_{VE} del 83 % [126], pudiendo llegar al 100 % con un proceso adicional de recarga mediante carga lenta. En base a esto, se definen las ecuaciones (5.1) y (5.2), las cuales permiten conocer la capacidad útil de energía que dispone el VE, para un determinado SoC.

$$Capacidad_{útil\%} = SoC_{VE} - SoC_{mínimo} \quad (5.1)$$

$$Capacidad_{útil_kWh} = Capacidad_{batería_kWh} \cdot \frac{Capacidad_{útil\%}}{100} \quad (5.2)$$

Por lo tanto, a partir de estas ecuaciones se definen algunos valores de energía utilizados en este estudio, los cuales se presentan en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Valores de energía utilizados en este estudio.

| $Capacidad_{útil}(\%)$ | $Capacidad_{útil} (kWh)$ | Comentario |
|------------------------|--------------------------|--|
| 45 - 15 = 30 % | 8.1 | Valor mínimo de energía que se considera en el estudio. No se consideran valores cada vez más pequeños a fin de no sobredimensionar la infraestructura de carga en carreteras. |
| 83 - 15 = 68 % | 18.36 | Capacidad máxima de energía que dispondrá el VE una vez que se haya recargado en una EVCS rápida, permitiendo un uso conservador con la finalidad de degradar en menor grado a la batería. |
| 100 - 15 = 85 % | 22.95 | Máximo valor de energía útil que dispondrá el VE si se cargara al 100%. |



5.3.2. Paso 2 – Identificación de factores que influyen en la ubicación de EVCS

El término factores hace referencia a las condiciones, variables o características que influyen en el proceso de selección de la ubicación de las estaciones de carga [127].

En este estudio se consideran factores económicos, eléctricos, ambientales, sociales, geográficos y de carretera, y de simulación para determinar la ubicación de estaciones de carga en la ruta Cuenca – Guayaquil vía E582, los cuales se explican a continuación.

5.3.2.1. Factores geográficos y de carretera

Los factores geográficos y de carretera tienen gran importancia en la selección del sitio para la ubicación de las estaciones de carga, ya que de estos dependerá la seguridad y el costo de construcción de la estación de carga.

- **Topografía del terreno:** la topografía del terreno (perfil de elevación) tiene gran influencia en la seguridad y la estabilidad de la construcción. El lugar en donde se ubicarán las estaciones de carga deben ser preferentemente terrenos planos y deberán estar lejos de zonas en donde se producen deslizamientos de tierras o donde existen suelos arenosos. Además, se toma como referencia el documento “Procedimiento para la autorización de factibilidades de nuevos centros de distribución” expedido por la Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero (ARCH), en donde se menciona que el terreno para el emplazamiento de gasolineras debe cumplir con “una distancia mínima de 50 metros desde el lindero más próximo del terreno a quebradas, ríos, acequias, peñas, acantilados u otros que determinen riesgos como deslaves o desbordamientos” [128].
- **Disponibilidad del terreno:** para la ubicación de las estaciones de carga se debe considerar un terreno o espacio que esté disponible físicamente con un área mínima de 27.5 m² por vehículo, espacio que considera parqueadero, estación de carga, y corredores de circulación y maniobra [129]. En este

estudio se considera un área mínima de 60 m² para el proceso de carga simultánea de dos VE.

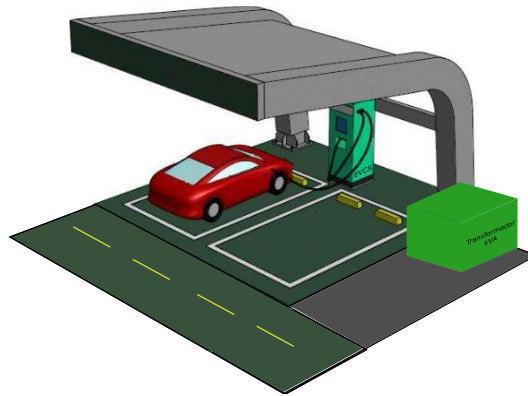


Figura 5.2: Distribución del terreno para la recarga del VE [130].

- **Estado de la red vial:** se debe tener presente el estado de la red vial nacional para conocer sobre el mantenimiento, ampliación y construcción de vías, así como información sobre afección por desastres naturales que dificultan la circulación por la vía.

5.3.2.2. Factores ambientales

Al seleccionar la ubicación de estación de carga es necesario tener presente las características y aspectos ambientales de los lugares en donde se desean implementar las estaciones de carga. El aspecto considerado para este factor es:

- **Áreas protegidas:** en la selección de la ubicación de estaciones de carga hay que tener presente las áreas protegidas del lugar. Se debe evitar estos sitios para preservar la naturaleza. En el caso de una carretera que atraviesa estos lugares, se deberá recurrir al marco legal para conocer si es posible construir este tipo de obras en dichos lugares.

5.3.2.3. Factores eléctricos

Las estaciones de carga de vehículos eléctricos deben conectarse a la red eléctrica, por lo que hay que considerar la disponibilidad del servicio de energía eléctrica en el lugar donde se ubicará la estación, además del impacto de la



estación sobre la calidad de energía en las redes de distribución eléctrica, por lo que se consideran los siguientes aspectos:

- **Disponibilidad de red eléctrica:** se deben considerar lugares con acceso cercano al suministro de electricidad, haciendo énfasis en los alimentadores trifásicos de la red de distribución de media tensión, para la instalación de la infraestructura de carga rápida (alta potencia).
- **Calidad de energía:** las estaciones de carga de vehículos eléctricos son consideradas cargas no lineales que se presentan en la red eléctrica como armónicos, los cuales afectan negativamente a los usuarios y operador de la red de energía eléctrica si no se toma en cuenta de manera oportuna.

El análisis sobre el impacto de las estaciones de carga rápida en la red eléctrica se realiza en el Capítulo 6. Caracterización de estaciones de carga rápida con salida en DC.

5.3.2.4. Factores sociales

Se consideran aspectos relacionados con la seguridad de los usuarios de los vehículos, así como de los equipos.

- **Seguridad:** las estaciones de carga de vehículos eléctricos deben ubicarse en lugares que garanticen la seguridad de los usuarios, así como de los equipos eléctricos; es decir, que la zona en donde se ubique la estación cuente con servicio de alumbrado público, que se encuentre dentro o cercana a un área poblada, y por lo general en donde se realicen actividades comerciales (restaurantes, sitios recreacionales). Además, la ubicación debe cumplir con las distancias mínimas de seguridad para realizar el emplazamiento de la estación de carga, tomando como referencia las distancias mínimas de seguridad para gasolineras establecido por la ARCH, en donde se debe cumplir que “la distancia a partir del lindero debe ser de 200 metros hasta el comienzo de una curva o comienzo de una tangente de curvas horizontales y verticales, redondeles, empates en forma de “Y” o “T”, tanto en vías urbanas y rurales” [128].

5.3.2.5. Factores económicos

Las estaciones de carga de vehículos eléctricos son productos de naturaleza comercial, por lo que es necesario considerar el costo del emplazamiento de la estación. En este estudio se consideran los siguientes aspectos:

- **Análisis de presupuesto referencial:** el presupuesto es el “cálculo anticipado de los gastos e ingresos de una obra o servicio” [131]. En el presupuesto se consideran los costos de materiales y equipos eléctricos, obras civiles, mano de obra y transporte.

Para el análisis de este criterio se toman los datos de precios de instalación de una estación de carga rápida (DC: 50kW – 350 kW [132]) analizados en el artículo “Pulling Back the Veil on EV Charging Station Costs” [133], los cuales se presentan en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Precios de instalación de una estación de carga rápida - nivel 3.

| | Rango de precios | Descripción |
|-----------------------------|-------------------|--|
| Estación de carga | \$12000 - \$35000 | Marca, requerimientos, tecnología, entre otros. |
| Materiales eléctricos | \$300 - \$600 | \$1.50 – 2.50/ft por conduit y cable, más otros materiales |
| Mano de obra (electricista) | \$1600 - \$3000 | \$50 - \$80/hora (por distancia-ft) \$500 - \$1000 por equipo de protección (breakers). |
| Otros materiales | \$100 - \$400 | \$25 - \$100/ft excavación / perforación: depende del tipo superficie, suelo y subsuelo |
| Otros trabajos | \$5000 - \$1500 | Montaje, señalización, protección y restauración. |
| Transformador | \$10000 - \$25000 | Transformador de 480 V. |
| Movilización | \$600 - \$1200 | Transporte de personal, materiales y equipos, entre otros. |
| Permisos | \$50 - \$200 | Permisos de construcción, entre otros. Estos costos varían dependiendo del país. |
| TOTAL | \$29650 - \$80400 | |

Los costos de instalación de una estación de carga rápida pueden variar dependiendo del precio de la estación de carga (marca, número de cargadores, nivel de potencia) y aumentar considerablemente en función de las



actualizaciones o mejoras de la red eléctrica que se deban realizar para la conexión de la estación. En caso de que se presenten escenarios en donde sea necesaria la construcción de una red eléctrica de media tensión trifásica, se debe tomar en cuenta estos costos de construcción para realizar el presupuesto referencial de implementación de la estación. En el Anexo #4, se presenta el resumen de costos unitarios de obra por kilómetro de alimentador primario trifásico tanto en 22 kV como en 13.8 kV, dados en el documento “Análisis de precios unitarios usados en obras de electrificación y mano de obra”, los cuales fueron facilitados por la gerencia de planificación de la Empresa Eléctrica Regional del Sur.

5.3.2.6. Factor de simulación

Este factor es relevante debido a la flexibilidad que presenta el modelo matemático para estimar el consumo energético de un VE entre diferentes ubicaciones a lo largo de la ruta, ya que mediante el uso de éste se debe buscar y/o seleccionar las ubicaciones de las EVCS, las cuales deben mantener una distancia apropiada entre sí que permita a los VE poder alcanzarlas, buscando que estas no estén muy alejadas ya que ponen en riesgo la autonomía de los VE, pero tampoco muy cercanas entre sí, porque se estaría gastando recursos y sobredimensionando la infraestructura de carga de la carretera.

- **Energía entre dos puntos:** es el valor de energía neta que puede consumir el VE entre el origen y la estación más próxima, o entre estaciones, y que garantizan al VE poder avanzar hacia una EVCS o su destino final con un SoC mínimo. Un mayor consumo de energía entre dos sitios se penaliza con un valor menor en su ponderación.

5.3.3. Paso 3 – Rango de evaluación de factores

En este paso se procede a especificar los rangos de evaluación de los factores mencionados en el paso 1. Todos los criterios de cada uno de los factores se evalúan en función de la ponderación e indicadores presentados en las tablas 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9.

Además, se realiza una jerarquización de los factores y se asigna un peso relativo (ver tabla 5.10) a cada uno de estos en base a la importancia que presentan en el estudio.

Tabla 5.3: Ponderación e indicadores de evaluación para el factor geográfico y de carretera.

| Rango | Ponderación | Distancia mínima | Disponibilidad de terreno | Estado de la red vial |
|--------------|-------------|----------------------|---------------------------|--|
| Ideal | 1 | $d \geq 50 m$ | $Area \geq 60 m^2$ | Bueno (no hay baches, buena señalización, no existen fallas geológicas) |
| Aceptable | 0.5 | $20 m \leq d < 50 m$ | - | Circular con precaución (derrumbes cercanos con carretera habilitada) |
| No aceptable | 0 | $d < 20 m$ | $Area < 60 m^2$ | Malo (hay derrumbes, mala señalización, fallas geológicas y la carretera está colapsada) |

Tabla 5.4: Ponderación e indicadores de evaluación para el factor eléctrico.

| Rango | Ponderación | Disponibilidad de red eléctrica | Calidad de energía |
|--------------|-------------|---------------------------------|---|
| Ideal | 1 | Red trifásica de MT | $THD_V \leq 8 \%$ y $Fp \geq 0.92$ |
| Aceptable | 0.5 | Red monofásica de MT | $THD_V \leq 8 \%$ y $Fp < 0.92$ o $THD_V > 8 \%$ y $Fp \geq 0.92$ |
| No aceptable | 0 | No existe red de MT | $THD_V > 8 \%$ o $Fp < 0.92$ |

Tabla 5.5: Ponderación e indicadores de evaluación para el factor económico.

| Rango | Peso | Costo de construcción de la estación de carga |
|--------------|------|---|
| Ideal | 1 | $\leq \$29650$ |
| Aceptable | 0.5 | $\$29650 < Costo \leq \80400 |
| No aceptable | 0 | $> \$80400$ |

Tabla 5.6: Ponderación e indicadores de evaluación para el factor social.

| Rango | Ponderación | Seguridad | | | |
|-----------|-------------|--------------------------------------|-------------------------------|---|--|
| | | Distancias mínimas de seguridad EVCS | Servicio de alumbrado público | Zona poblada | Áreas comerciales (restaurantes, sitios recreacionales, etc.) |
| Ideal | 1 | $d \geq 200 m$ | Si existe | Dentro de un pueblo, recinto, comunidad | Áreas comerciales ≥ 2 , en un radio $\leq 200 m$. |
| Aceptable | 0.5 | $120 \leq d < 200$ | - | Presencia de algunas casas al costado de la vía | Áreas comerciales = 1, en un radio $\leq 200 m$ o áreas comerciales ≥ 2 , en $200 m < radio \leq 400 m$ |

| | | | | | |
|---------------------|---|-------------|-----------|---------------|------------------------------|
| No aceptable | 0 | $d < 120 m$ | No existe | Zona desolada | No existen áreas comerciales |
|---------------------|---|-------------|-----------|---------------|------------------------------|

Tabla 5.7: Ponderación e indicadores de evaluación para el factor ambiental.

| Rango | Ponderación | Áreas protegidas |
|---------------------|-------------|---|
| Ideal | 1 | Fuera del área protegida |
| Aceptable | 0.5 | Dentro del área protegida (se debe gestionar la obtención de permisos ambientales y de construcción, entre otros) |
| No aceptable | 0 | Dentro del área protegida (no se puede obtener permisos de construcción) |

Tabla 5.8: Ponderación e indicadores de evaluación para el factor de simulación: energía neta consumida entre la ciudad de partida y la EVCS adyacente.

| Ponderación | Porcentaje de capacidad útil que consume el VE | Energía neta que consume el VE [kWh] |
|-------------|--|--------------------------------------|
| 1 | $30 \leq \%E_{batería} \leq 35$ | $8.1 \leq \Delta E \leq 9.45$ |
| 0.9 | $35 < \%E_{batería} \leq 40$ | $9.45 < \Delta E \leq 10.8$ |
| 0.8 | $40 < \%E_{batería} \leq 45$ | $10.8 < \Delta E \leq 12.15$ |
| 0.7 | $45 < \%E_{batería} \leq 50$ | $12.15 < \Delta E \leq 13.5$ |
| 0.4 | $50 < \%E_{batería} \leq 68$ | $13.5 < \Delta E \leq 18.36$ |
| 0.1 | $68 < \%E_{batería} \leq 85$ | $18.36 < \Delta E \leq 22.95$ |
| 0 | $\%E_{batería} > 85$ | $\Delta E > 22.95$ |

Tabla 5.9: Ponderación e indicadores de evaluación para el factor de simulación: energía neta consumida entre dos EVCS.

| Ponderación | Porcentaje de capacidad útil que consume el VE | Energía neta que consume el VE [kWh] |
|-------------|--|---|
| 1 | $45 \leq \%E_{batería} \leq 50$ | $12.15 \leq \Delta E \leq 13.5$ |
| 0.8 | $50 < \%E_{batería} \leq 55$ | $13.5 < \Delta E \leq 14.85$ |
| 0.5 | $55 < \%E_{batería} \leq 60$ | $14.85 < \Delta E \leq 16.2$ |
| 0.1 | $60 < \%E_{batería} \leq 68$ | $16.2 < \Delta E \leq 18.36$ |
| 0 | $\%E_{batería} < 45$ o $\%E_{batería} > 68$ | $\Delta E < 12.15$ o $\Delta E > 18.36$ |

Tabla 5.10: Jerarquización de los factores y su ponderación relativa por sitio.

| Factores | Porcentaje de viabilidad del sitio (%) | Comentario |
|----------------------------------|--|---|
| Geográfico y de carretera | 24 | El factor geográfico y de carretera debe cumplir con un porcentaje mínimo de 12 %, teniendo en cuenta |
| Eléctrico | 20 | |
| Económico | 16 | |

| | | |
|-----------------------|----|---|
| Social | 12 | que debe satisfacer la condición de disponibilidad de terreno y un estado de la red vial aceptable; y el factor ambiental debe cumplir con un mínimo de 4 % para continuar con el análisis de los factores restantes. |
| Ambiental | 8 | |
| \sum <i>Parcial</i> | 80 | |

El procedimiento de evaluación se lleva a cabo una vez que se han identificado todas las ubicaciones de las EVCS por escenario. En cada una de las ubicaciones se ponderan los criterios (ver tabla 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7) asociados a los factores geográficos, eléctricos, económicos, sociales y ambientales; posteriormente, se realiza el sumatorio total por factor y este valor se lleva a su equivalente porcentual, con los datos de la tabla 5.10, para obtener una evaluación sobre el 80 % por sitio. Por último, es importante obtener una calificación total del escenario, obteniendo el promedio de todas las ponderaciones detalladas por sitio.

Posterior a este proceso, se pondera cada escenario mediante el factor de simulación (20 %) a partir de las simulaciones realizadas, tomando en cuenta las consideraciones planteadas en cada escenario; y finalmente se obtiene una evaluación sobre el 100 %, como se indica en la tabla 5.11.

Tabla 5.11: Ponderación total del escenario de estudio.

| | | Porcentaje de viabilidad por escenario (%) |
|--|-----------------------------------|--|
| Ponderación parcial de factores | | 80 |
| Factor de simulación | Origen – EVCS | 10 |
| | EVCS – EVCS / EVCS – Final | 10 |
| \sum <i>Total</i> | | 100 |

5.3.4. Paso 4 – Caracterización de la ruta de estudio

Se identifican las características ambientales, de la red eléctrica, y del estado de la vía, referentes a la ruta de estudio, para analizar las posibles limitaciones

y ventajas a las que está sujeto el proceso de selección de la ubicación de las EVCS. En la figura 5.3 se ilustra la organización territorial de la zona suroeste del Ecuador, y en la tabla 5.12 se presentan algunas características generales de la provincia del Azuay y del Guayas.



Figura 5.3: Organización territorial de la provincia del Azuay y Guayas [134].

Tabla 5.12: Características generales de la provincia del Azuay y del Guayas [135] [136] [137].

| Provincia | Azuay | Guayas |
|----------------------|---------|-----------|
| Región | Sierra | Costa |
| Ciudad | Cuenca | Guayaquil |
| Número de habitantes | 636 996 | 2 723 665 |
| Altitud [m. s. n. m] | 2 550 | 4 |

La ruta de estudio Cuenca – Guayaquil presenta las siguientes características viales:

- 1) **Vía Colectora Cuenca - Puerto Inca (E582)**, se trata de una de las 43 vías secundarias con las que cuenta el país, su sentido es de oeste a este, ubicada entre las provincias de Azuay y Guayas [138]. La vía atraviesa el Parque Nacional El Cajas, una de las 56 áreas protegidas a nivel nacional, por lo que no se permite la circulación de transporte liviano o pesado con carga química, tóxica u alguna otra sustancia que afecte al ecosistema. El recorrido que se emplea para el estudio es: Cuenca (E582), ascenso por

el Parque Nacional El Cajas – Molleturo y descenso hacia Tamarindo - Puerto Inca (Troncal de la Costa E25, en donde se encuentra la Reserva Ecológica Manglares Churute) – Virgen de Fátima (E40) – Durán– Guayaquil, como se muestra en la figura 5.4. Se trata de una las principales rutas entre Cuenca y Guayaquil, con un recorrido aproximado de 196 km y un tiempo estimado de viaje de 3 horas y 20 minutos.

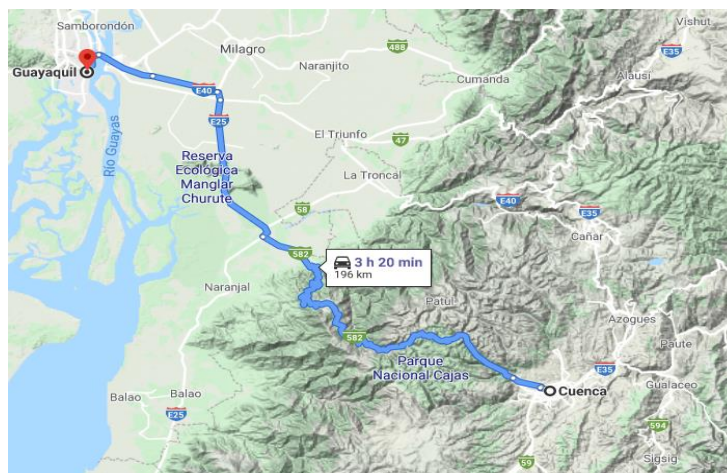


Figura 5.4: Vista satelital con relieve topográfico y elevación de la ruta Cuenca – Guayaquil vía E582.

Toda la ruta Cuenca – Guayaquil vía E582 se encuentra pavimentada con aproximadamente 110 km reconstruidos con hormigón armado. La mayor parte de la vía tiene 2 carriles (1 por sentido), sin embargo, en la zona montañosa de Molleturo – Tamarindo la vía cuenta con 3 carriles (1 en el sentido de descenso de la zona montañosa y 2 para el sentido de ascenso de hacia la zona montañosa) y finalmente en la zona de la Troncal de la Costa existen 4 carriles (2 carriles para cada sentido) [138]. El estado de la vía actualmente es bueno con base en la publicación del mapa del estado de la red vial estatal [139]; sin embargo, en la vía Cuenca – Molleturo – Naranjal se recomienda manejar con precaución en los kilómetros 57, 69, 70, 71, 84, 88 y 91 [140].

- **Características ambientales**

En el Ecuador existen 56 reservas naturales protegidas, ubicadas en las cuatro regiones geográficas del país, con una extensión aproximada del 20 % de la superficie del Ecuador [141]. Un área o reserva natural protegida “es un

espacio geográfico claramente definido, reconocido, dedicado y gestionado, mediante medios legales u otros tipos de medios eficaces para conseguir la conservación a largo plazo de la naturaleza y de sus servicios ecosistémicos y sus valores culturales asociados” [142].

En la ruta Cuenca – Guayaquil vía E582 existen áreas protegidas y lugares de gran biodiversidad que deben ser considerados para la selección de la ubicación de las estaciones de carga. Las áreas protegidas que atraviesan la ruta de estudio (ver figura 5.5) son:

- Parque Nacional El Cajas, ubicado en la provincia del Azuay, es atravesado por la Vía Colectora E582 Cuenca – Molleturo – Tamarindo - Puerto Inca. El parque cuenta con una extensión de 28544 hectáreas y con un rango altitudinal entre 3160 y 4450 m.s.n.m. [143].
- Reserva Ecológica Manglares Churute, ubicado en la provincia del Guayas, es atravesado por la vía Troncal de la Costa E25, en las localidades de Puerto Inca – Virgen de Fátima. La reserva cuenta con una extensión de 49389 hectáreas y con un rango altitudinal entre 0 y 680 m.s.n.m. [144].

La conservación de estas reservas naturales es fundamental en el proceso de cambio de la matriz energética debido a los recursos que provienen de estas áreas [145].

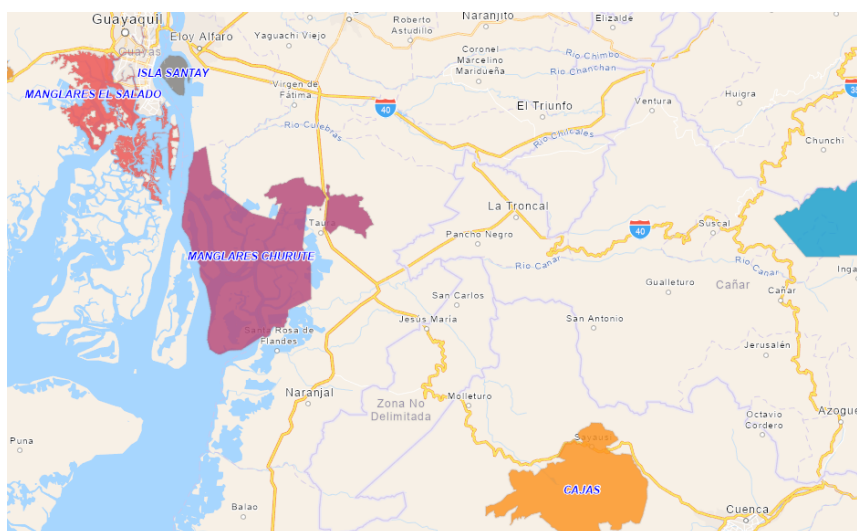


Figura 5.5: Áreas protegidas en la ruta Cuenca - Guayaquil por la vía Colectora Cuenca – Puerto Inca (E582)[146].

de georreferenciación, empresas eléctricas de distribución a la que pertenecen dichos circuitos, así como los niveles normalizados de medio y bajo voltaje de cada empresa distribuidora. Esto con el objetivo de conocer las características más importantes de la red eléctrica a lo largo de la vía E582.

Tabla 5.14: Información general de las redes de distribución eléctrica en la ruta de estudio [149] [150].

| Localidad | Empresa Distribuidora | No. Alimentador | Subestación | Referencia | Comentario |
|----------------------------------|-----------------------|---|-------------|---|--|
| Cuenca | E.E.R.C.S. | No se considera ningún alimentador en Cuenca debido a que el estudio se centra en el análisis de la carretera Cuenca – Guayaquil vía E582. Además, la ciudad cuenta con una estación de carga lenta ubicada en el parqueadero del Parque de la Madre. | | | |
| Sayausí | E.E.R.C.S. | 0527 | El Arenal | Poste: # 320658 Coordenada: -2,8719168, -79,0766194 | Empieza el alimentador 0527 / “Y” de Sayausí – Salida de Cuenca |
| Antes del Ingreso a Tamarindo | E.E.R.C.S. | 0527 | El Arenal | Poste: # 501686R2 Coordenada: -2.622772, -79.456709 | Termina el alimentador 0527 y el área de concesión de E.E.R.C.S. |
| Ingreso a Tamarindo y Cacao Loma | CNEL EP – Milagro | DMLA-016 | Puerto Inca | Poste: #12042376 Coordenada: -2.622985, -79.462509 | Punto de partida para el área de concesión de CNEL EP Milagro |
| Puerto Inca | CNEL EP – Milagro | DMLA-016 | Puerto Inca | Poste: #625503 Coordenada: -2.529929, -79.558233 | Termina el alimentador DMLA- 016, de CNEL EP - Milagro |
| Puerto Inca | CNEL EP - Milagro | DMLA-015 | Puerto Inca | Poste: #629665 Coordenada: -2.5299048, -79.5582503 | Empieza el alimentador DMLA-015, de CNEL EP - Milagro |
| Parroquia Taura | CNEL EP - Milagro | DMLA-015 | Puerto Inca | Poste: #12039587 Coordenada: -2.347309, -79.634271 | Termina el alimentador DMLA-015, de CNEL EP – Milagro |
| Parroquia Taura | CNEL EP - Milagro | DMLA-010 | Montero 2 | Poste: #12031894 Coordenada: -2.3308098, -79.6360543 | Empieza el alimentador DMLA-010, de CNEL EP - Milagro |
| Virgen Fátima | CNEL EP - Milagro | DMLA-010 | Montero 2 | Poste: #12031901 Coordenada: | Termina el alimentador DMLA-010, de |



| | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------|--|-----------|--|--|
| | | | | -2.242439, -79.637136 | CNEL EP – Milagro |
| Virgen Fátima | CNEL EP - Milagro | DMLA-012 | Montero 2 | Poste: #12048015 Coordenada: -2.240215, -79.638185 | Empieza el alimentador DMLA-012, de CNEL EP - Milagro |
| Parroquia Eloy Alfaro (Durán) | CNEL EP - Milagro | DMLA-012 | Montero 2 | Poste: #12044037 Coordenada: -2.209878, -79.71953 | Termina el alimentador DMLA-012, de CNEL EP – Milagro |
| Parroquia Eloy Alfaro (Durán) | CNEL EP – Guayas Los Ríos | 28 de Agosto | El Recreo | Poste: #09018485 Coordenada: -2.202613, -79.75388 | Empieza el alimentador 28 de Agosto, de CNEL EP – Guayas Los Ríos |
| Intercambiador Entrada a Durán | CNEL EP – Guayas Los Ríos | 28 de Agosto | El Recreo | Poste: #09028595 Coordenada: -2.18554, -79.810774 | Termina el alimentado 28 de Agosto, de CNEL EP – Guayas Los Ríos |
| Guayaquil | CNEL EP – Guayaquil | No se considera ningún alimentador a la llegada a Guayaquil debido a que la ciudad <i>cuenta con estaciones de carga lenta</i> , siendo las más cercanas las que se encuentran en los parqueaderos de San Marino Shopping, Mall del Sol y City Mall. | | | |

Tabla 5.15: Características eléctricas de los alimentadores en la ruta de estudio [149] [150].

| No. Alimentador | Tipo de red | Tipo de sistema | Nivel de Medio Voltaje [kV] | Referencia |
|-----------------|-------------|-----------------|-----------------------------|---|
| 0527 | Trifásico | Aéreo | 22 | Transición / Parroquia: Molleturo / Poste: #321417 Coordenada: -2.704565, -79.434116 |
| | Monofásico | Aéreo | 12.7 | |
| DMLA-016 | Monofásico | Aéreo | 7.97 | Transición / Puerto Inca / Poste: #12042351 Coordenada: -2.615752, -79.469246 |
| | Trifásico | Aéreo | 13.8 | |
| DMLA-015 | Trifásico | Aéreo | 13.8 | Inicio del alimentador Poste: #629665 Coordenada: -2.5299048, -79.5582503 Final del alimentador Poste: #12039587 Coordenada: |

| | | | | |
|--------------|------------|-------|------|--|
| | | | | -2.347309, -79.634271 |
| DMLA-010 | Trifásico | Aéreo | 13.8 | Transición / Redondel Virgen de Fátima / Poste: #606314 Coordenada: -2.25193, -79.636428 |
| | Monofásico | Aéreo | 7.97 | |
| DMLA-012 | Monofásico | Aéreo | 7.97 | Transición / Redondel Vía a Durán/ Poste: #60904 Coordenada: -2.235551, -79.641415 |
| | Trifásico | Aéreo | 13.8 | |
| | Monofásico | Aéreo | 7.97 | Transición / Yaguachi Viejo (Cone) Poste: #12043997 Coordenada: -2.217663, -79.69787 |
| 28 de Agosto | Monofásico | Aéreo | 7.97 | Parroquia Eloy Alfaro (Durán) Poste: #09018615 Coordenada: -2.198937, -79.779267 |
| | Trifásico | Aéreo | 13.8 | |

En la figura 5.7 se observa la distribución geográfica de los alimentadores a lo largo de la ruta de estudio, en la cual se muestran los voltajes trifásicos por cada alimentador.



Figura 5.7: Mapa de alimentadores en la ruta de estudio.

Tabla 5.16: Modelo general del servicio en baja tensión para sistemas trifásicos – E.E.R.C.S. [151].

| Voltajes [V] | #Hilos | Descripción |
|--------------|--|--|
| 220/127 | Estrella 4 hilos (3 Fases – Neutro) | Trifásicos con neutro sólidamente aterrado. Servicio suministrado para cargas trifásicas. |
| 208/120 | Estrella 4 hilos (3 Fases – Neutro) | Trifásicos con neutro sólidamente aterrado. Servicio suministrado para cargas trifásicas. |
| 240/120 | Delta abierto 4 hilos (3 Fases - Neutro) | Trifásicos con neutro sólidamente aterrado. Servicio suministrado para cargas trifásicas. (Utilizado solo en casos extremos) |

5.3.5. Paso 5 – Panorama del mercado de VE en Ecuador

Este tipo de tecnología vehicular se introdujo en el mercado automotor nacional en el año 2015, por lo que todavía no existe una tendencia marcada en el crecimiento de VE, comportamiento que se refleja en la curva de ventas mensuales (ver figura 5.8) presentada por la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE), en donde se observa que en el año 2015 se vendió un solo VE, mientras que en los siguientes tres años se vendieron 84, 123 y 130 VE, respectivamente, lo que demuestra un ligero crecimiento en este periodo de tiempo. A partir del año 2019 se observa un decrecimiento del 20 % con respecto al año anterior y, hasta junio del presente año, solo se han vendido 27 unidades, por lo que se esperan ventas menores que los años anteriores debido a la situación actual del país.

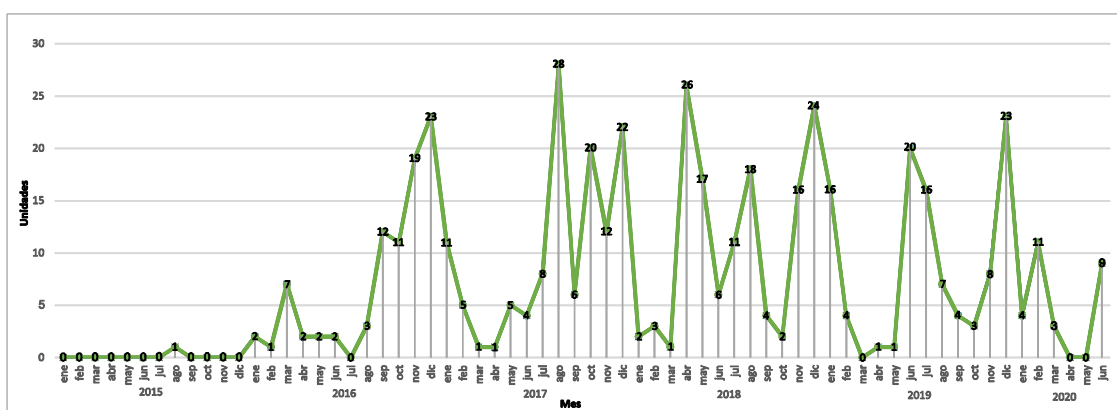


Figura 5.8: Ventas mensuales de VE [4].

Las principales marcas de VE que se comercializan en Ecuador se muestran en la tabla 5.17, en donde se presentan los modelos de VE con mayor autonomía y mayores ventas en el mercado automotriz.

Los valores de autonomía que se presentan en la tabla 5.17, son tomados de los datos de los fabricantes de los vehículos, los cuales hacen uso de diferentes ciclos de conducción estandarizados, por lo que estas autonomías pueden verse reducidas en ciclos de conducción real.

Tabla 5.17: Marcas y características de VE que se comercializan en Ecuador [152].

| Marca | Modelo | No. VE periodo 2016-2019 | Autonomía (km) | Capacidad de la batería (kWh) | Tipo de conector para recarga |
|------------|------------------------------|--------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Dayang | Chok Cross AC 5P 4x2 TA EV | 44 | 100 | 6.1 | Schuko |
| Renault | Twizy | 51 | 100 | 6.1 | Schuko |
| Kia | Soul EV | 129 | 167 | 27 | CHAdeMO-AC Tipo 1 |
| Hanteng | X5 AC 5P 4x2 TA EV | 1 | 252 | 42.7 | GB/T AC |
| Wolkswagen | E-Golf B11B1 AC 5P 4X2 TA EV | 1 | 300 | 35.8 | AC Tipo 2 |
| BYD | E5 AC EV | 35 | 305 | 47.5 | GB/T DC-AC Tipo 2 |

5.3.6. Paso 6 – Definición del tipo de EVCS y requisitos para la selección de una EVCS

Las EVCS se pueden clasificar como se muestra en la figura 5.9:

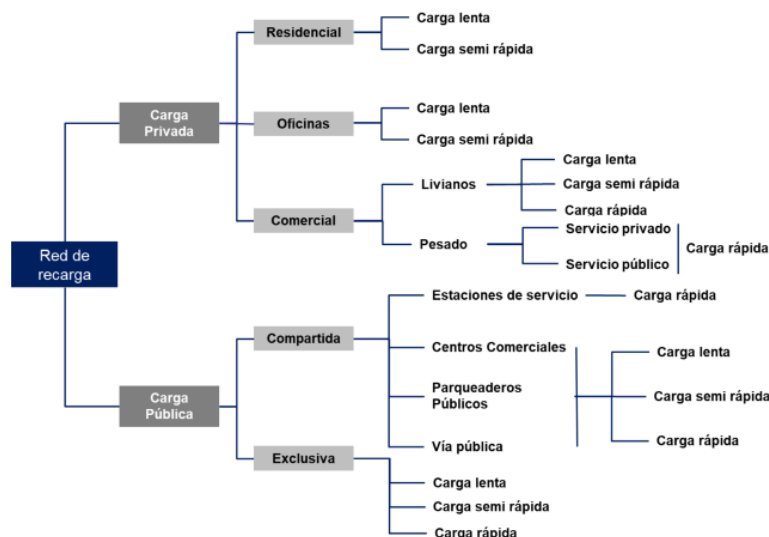


Figura 5.9: Clasificación de las EVCS [129].

Para determinar los requisitos técnicos que deben cumplir la EVCS es preciso considerar los siguientes criterios:



- **Nivel de potencia:** la potencia de la estación está relacionada con los tiempos de carga de la batería, en función de la necesidad de los usuarios.
- **Tipos de conectores:** la elección del tipo de conector está influenciada por la tendencia de las ventas y/o proyecciones futuras del mercado nacional de VE.
- **Características eléctricas:** frecuencia, factor de potencia, entre otros.
- **Condiciones del entorno:** es necesario tener en cuenta el clima y sus variaciones a lo largo del tiempo, para así seleccionar los equipos con el grado de protección adecuado frente a la entrada de agentes externos como agua y polvo (grado IP), así como la protección contra golpes mecánicos externos (grado IK).

En este estudio se consideran estaciones de carga rápida de carácter público compartidas a lo largo de la vía; esta infraestructura permitirá cargar la batería de cualquier VE liviano en el menor tiempo de espera posible, haciendo la experiencia lo más cercano a lo que representa “repostar” un vehículo de combustión interna.

Las estaciones de carga rápida que se deben considerar son aquellas que poseen multiconector; es decir, de al menos dos y máximo tres tipos de conectores para AC y DC, de acuerdo a la actual oferta por parte de los proveedores, para que de esta forma cualquier marca y modelo de vehículo eléctrico pueda ser atendido, sin importar su país de fabricación.

En este estudio se consideran estaciones de carga rápida con tres conectores: DC tipo CHAdeMO, GB/T 20234 DC y AC tipo 2, tomando como referencia los VE más vendidos y de mayor autonomía que se comercializan en el país (ver tabla 5.17); sin embargo, estas opciones pueden variar en el futuro debido a que estos tipos de conectores e infraestructura de carga tienen que adaptarse a la oferta de VE que existe en el país.

La ruta Cuenca – Guayaquil vía E582 presenta diferentes tipos de climas debido a sus diferencias de alturas y regiones territoriales, pudiendo variar desde un clima de tipo páramo andino hasta un clima tropical húmedo – seco, por lo que la estación debe cumplir con un grado de protección contra la entrada de agentes extraños sólidos y líquidos de al menos IP53. Además, se debe considerar una protección frente a impactos mecánicos externos de IK10.

Por lo tanto, las características generales que la estación de carga debe cumplir en base a los criterios propuestos se presentan a continuación:

Tabla 5.18: Requisitos generales de la EVCS.

| | | |
|--------------------------------|-----------|-------------|
| Potencia de salida (kW) | DC | ≥ 50 |
| | AC | 43 |
| Tipo de conector | DC | CHAdMO |
| | DC | GB/T |
| | AC | Tipo 2 |
| Factor de potencia | | ≥ 0.96 |
| Frecuencia (Hz) | | 60 |
| Eficiencia (%) | | ≥ 90 |
| Grado de protección | IP | ≥ 53 |
| | IK | 10 |

5.3.7. Paso 7 – Selección de la EVCS

Para realizar la selección de estaciones de carga rápida se estudiaron diversos proveedores de EVCS con base en los requisitos propuestos en la tabla 5.18, y se seleccionó la estación de carga ABB Terra 54 CJG, la cual se muestra en la figura 5.10.

Los tiempos de carga típicos de esta estación oscilan entre 15 y 30 minutos [153], alcanzado un SoC que oscila entre el 80 % y 94 %, valor dependiente de la potencia de la estación de carga, de la capacidad de las baterías de alto voltaje y del SoC inicial [126]. La ficha técnica completa de esta estación se presenta en el Anexo #5, y las características técnicas generales de la estación se indican en la tabla 5.19.



Figura 5.10: Estación de carga rápida ABB Terra 54 CJG [153].

Tabla 5.19: Características técnicas de la EVCS – ABB Terra 54 CJG [154].

| Parámetro | Valor |
|-------------------------------|--|
| Voltaje nominal de entrada | Trifásico: 400 VAC \pm 10 % |
| Conexión de entrada AC | 3P + N + PE (Configuración en estrella) |
| Máxima potencia de entrada | DC+AC funcionando simultáneamente= 55 kVA+43 kVA=98 kVA |
| Frecuencia de entrada | 50 Hz / 60 Hz |
| No. de conectores | 3 conectores= 1 conector CHAdeMO + 1 conector GB/T DC + 1 conector tipo 2 AC |
| Potencia nominal por conector | DC: 50 kW – AC: 43 kW |
| Eficiencia | > 94 % |
| Factor de potencia | > 0.96 |
| Grado de protección | IP54 / IK10 |

Como se observa en la tabla 5.19, el voltaje de entrada de alimentación de la estación de carga es un nivel de voltaje no normalizado para sistemas trifásicos en el país, como se indicó en la tabla 5.16, además que el nivel de potencia requerido por la EVCS supera el límite de potencia establecido por las empresas eléctricas de distribución para proporcionar servicio eléctrico desde sus redes de distribución y transformadores, con base en la regulación No. ARCONEL 004/18 - Distribución y comercialización de energía eléctrica [155], en donde se indica que los nuevos consumidores con demanda declarada menor o igual a 12 kW serán atendidos en la red de bajo voltaje, y que los nuevos consumidores con cargas declaradas mayores a 12 kW deberán ser atendidos en la red de medio o alto voltaje; por lo tanto, el diseño para la alimentación de las estaciones de

carga rápida de alta potencia se realiza a través de la derivación del circuito trifásico de media tensión de la empresa distribuidora en donde se localice la estación, hacia un nuevo centro de transformación que alimenta la infraestructura de carga (ver figura 5.11), el cual se dimensiona a continuación.

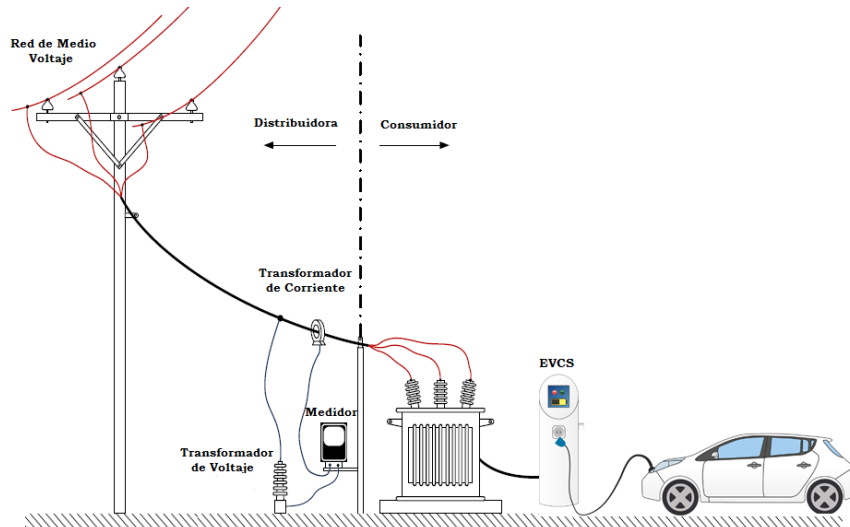


Figura 5.11: Esquema del punto de entrega de energía eléctrica en medio voltaje a la EVCS.

Para el dimensionamiento del transformador se tiene en cuenta los siguientes criterios:

- Se considera una estación de carga para cada sitio seleccionado.
- Los conectores de la estación de carga pueden funcionar simultáneamente, según la ficha técnica presentada en el Anexo #5.
- Se considera un factor de demanda igual a 1 debido a que los dos conectores pueden operar simultáneamente, por lo que la carga total instalada es igual a la demanda máxima; además que el intervalo de carga a potencia nominal que se presenta en el régimen de corriente constante es superior al intervalo de tiempo del régimen de voltaje constante. Este comportamiento se puede observar en el Capítulo 6. Caracterización de estaciones de carga rápida con salida en DC.
- Para el dimensionamiento del transformador se selecciona el factor de potencia de la estación presentado en la tabla 5.19.

Tabla 5.20: Dimensionamiento del transformador para la alimentación de la EVCS.

| | # Fases | Tensión (secundario) [V] | Potencia [kW] | Factor de potencia | Corriente [A] | Potencia [kVA] | Factor de demanda | kVA máx. |
|-------------------|---------|--------------------------|---------------|--------------------|---------------|----------------|-----------------------------|----------|
| Estación de carga | 3F,4C | 400 | 94.08 | 0.96 | 141.45 | 98 | 1 | 98 |
| | | | | | | | Demanda máxima [kVA] | 98 |
| | | | | | | | Demanda máxima [kW] | 94.08 |

Como se observa en la tabla 5.20, la potencia que demanda la estación de carga es 98 kVA, por lo que se escoge un transformador trifásico de 112.5 kVA, de acuerdo a las capacidades nominales definidas en la homologación de las Unidades de Propiedad y de Construcción por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER), actual Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables (MERNNR).

5.3.8. Paso 8 – Selección y análisis de los sitios para la ubicación de EVCS mediante el modelo matemático

5.3.8.1. Análisis de la ruta de estudio

El recorrido empieza en el Laboratorio de Microrred Eléctrica Campus – Balzay, con coordenadas (-2.891839575,-79.0385083) hasta el Aeropuerto José Joaquín de Olmedo, con coordenadas (-2.14721322,-79.88538347).

El recorrido presenta un perfil de elevación como se muestra en la figura 5.12, donde el punto de inicio se encuentra a una altura de 2595 m.s.n.m. y el punto final a 2 m.s.n.m., en el cual el punto máximo alcanza los 4176 m.s.n.m. ubicado en el sector denominado mirador “Tres Cruces”, con coordenadas (-2.775910034,-79.246011364). La distancia entre el punto inicial y máximo es de 35.45 km, en donde el diferencial de altura entre estos puntos es de $\Delta_h=1581$ m, con una pendiente de 44.59 m/km; mientras que la distancia entre el punto máximo y final es de 159.67 km, y el diferencial de altura es de $\Delta_h=4174$ m, con una pendiente de 26.14 m/km.

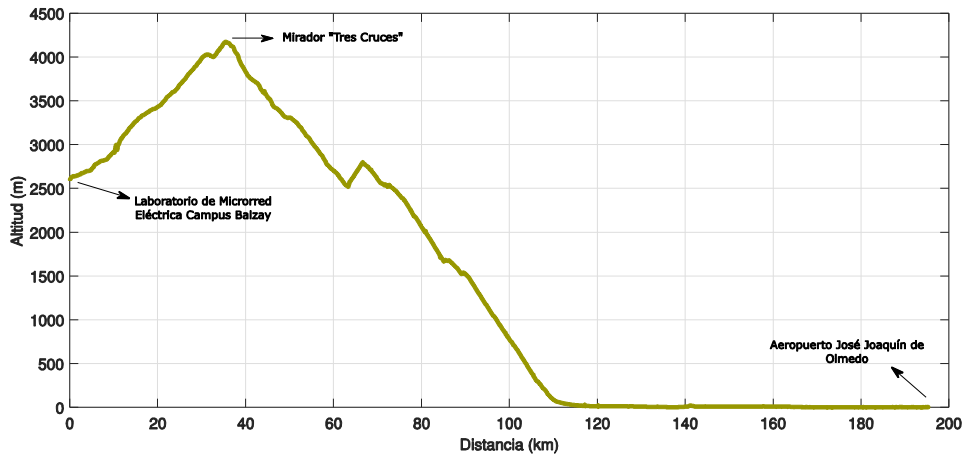


Figura 5.12: Perfil de elevación de la ruta Cuenca - Guayaquil.

A continuación, se realiza la simulación del modelo matemático para conocer la cantidad de energía neta que el VE consume en la ruta de estudio, tanto en el recorrido de ida como de regreso, teniendo en cuenta una masa de 69 kg (masa promedio de una persona adulta) y una masa de 345 kg (vehículo cargado con todos sus ocupantes). En el Anexo #6 se presentan los valores de energía de carga y descarga obtenidos mediante la simulación del modelo matemático, para estos dos casos de estudio; además, en las figuras 5.13 y 5.14, se muestran los valores de energía neta consumida, tanto para el recorrido de ida como de regreso.

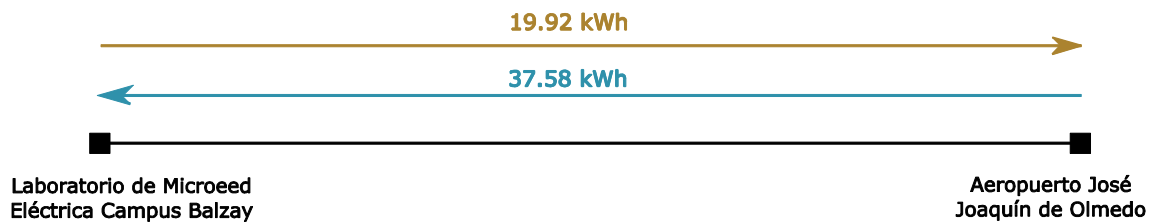


Figura 5.13: Energía neta consumida en la ruta de estudio, tanto para la ida como al regreso, cuando el VE está cargado con una masa de 69 kg.

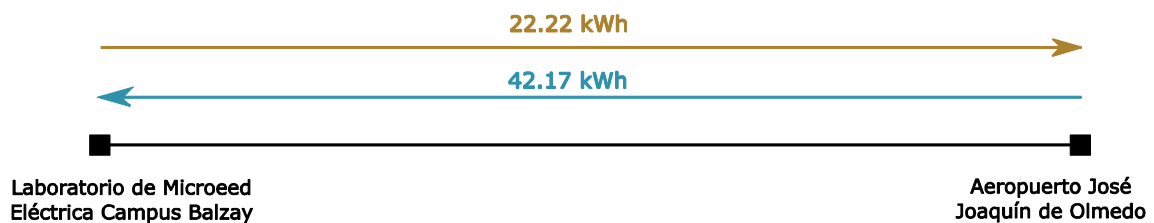


Figura 5.14: Energía neta consumida en la ruta de estudio, tanto para la ida como al regreso, cuando el VE está cargado con una masa de 345 kg.

En la figura 5.13 se observa que cuando el VE realiza el viaje de ida con menor masa, la energía neta consumida disminuye en 2.3 kWh con respecto al viaje con una masa de 345 kg; mientras que para el recorrido de regreso, disminuye en 4.6 kWh (ver figura 5.14). Por lo tanto, las simulaciones para identificar las ubicaciones de EVCS se realizan teniendo en cuenta una masa de 345 kg, debido a que con esta condición el VE consume una mayor cantidad de energía, tanto en la ruta de ida como de regreso. Con esta condición se debe garantizar que los VE puedan alcanzar las EVCS sin comprometer su autonomía.

5.3.8.2. Escenario base

A continuación, se presentan las consideraciones iniciales asumidas en el estudio para identificar las posibles ubicaciones de las EVCS en la ruta de estudio:

- El valor mínimo de SoC es de 15 % para conservar la vida útil de la batería, y cuando el VE hace uso de una estación de carga rápida el SoC alcanza el 83 %, teniendo capacidad útil en la batería de 18.36 kWh [126].
- Se realiza las simulaciones tanto a la ida como al regreso de la ruta de estudio, teniendo en cuenta que la condición más crítica se da cuando el VE sale desde una ciudad hacia la EVCS más próxima con un SoC del 45 %, lo que representa una capacidad útil de la batería del 30 % (asegurando su vida útil), equivalente a 8.1 kWh de autonomía. Este es el valor mínimo que se considera como capacidad útil para este estudio, ya que con valores inferiores a éste se estaría sobredimensionando la red de infraestructura de carga en la carretera, además que al estar cerca del límite urbano se debería maximizar el uso de las EVCS en la ciudad.
- El vehículo se encuentra cargado con todos los ocupantes, con una masa promedio de 345 kg.



Recorrido Cuenca → Guayaquil

Una vez identificado las características de la ruta, se realizan las simulaciones para determinar los sitios en donde el VE debe realizar los procesos de recarga, los cuales se presentan en la tabla 5.21.

Tabla 5.21: Escenario base: consumo de energía obtenido mediante el modelo matemático (Matlab®) de la ruta de ida Cuenca – Guayaquil.

| | Lab. Balzay – Virgen del Cajas | Virgen del Cajas - Aeropuerto |
|-------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Distancia (km) | 23.90 | 171.30 |
| Energía de descarga (kWh) | 8.45 | 32.96 |
| Energía de carga (kWh) | -0.35 | -18.84 |
| Energía neta consumida (kWh) | 8.1 | 14.11 |

De acuerdo a los valores obtenidos de la simulación y como se observa en la figura 5.15, se evidencia que el VE al salir desde el Laboratorio de Balzay/Cuenca con una capacidad útil del 30 %, avanza hasta el Santuario de la Virgen del Cajas, con un consumo de energía neta de 8.1 kWh, por lo que en este sitio el VE realiza el primer proceso de recarga. Posteriormente, el VE continúa el viaje hasta el mirador “Tres Cruces”, y su SoC disminuye hasta el 68 %; al descender hasta el sector de Tamarindo, con una pendiente aproximada de 54.36 m/km, el vehículo experimenta el mayor aporte desde el sistema de frenado regenerativo por lo que el SoC es de 80 %. A partir de este punto, el SoC disminuye hasta llegar a la ciudad de Guayaquil con 31 %, habiendo consumido desde la estación Virgen del Cajas hasta el Aeropuerto 14.11 kWh.

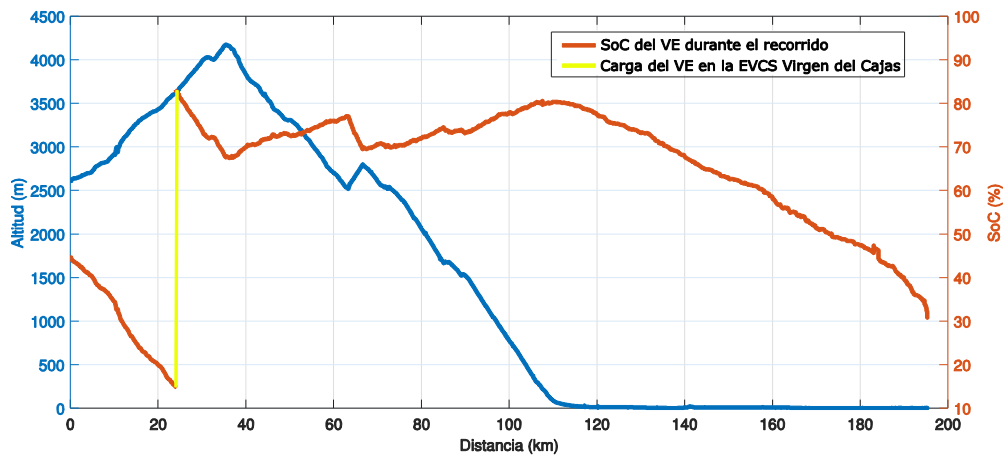


Figura 5.15: Escenario base- SoC del VE durante la ruta de regreso.

Recorrido Guayaquil → Cuenca

El recorrido empieza en el Aeropuerto José Joaquín de Olmedo hasta el Laboratorio de Microrred Eléctrica Campus – Balzay.

De igual manera, se considera una capacidad útil del 30 % a la salida de Guayaquil para alcanzar la EVCS más próxima.

En la tabla 5.22 se presentan los valores de energía simulados por tramos, en donde se identificó cada una de las ubicaciones para las EVCS teniendo en cuenta los límites máximos de energía (autonomía) para el estudio.

Tabla 5.22: Escenario base: consumo de energía obtenido mediante el modelo matemático (Matlab®) de la ruta de regreso Guayaquil – Cuenca.

| | Aeropuerto – Cerritos | Cerritos – Sector Hierba Buena | Vista Linda – Lab. Balzay |
|-------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Distancia (km) | 51.80 | 61.47 | 81.20 |
| Energía de descarga (kWh) | 11.11 | 21.29 | 22.37 |
| Energía de carga (kWh) | -3.01 | -2.93 | -6.69 |
| Energía neta consumida (kWh) | 8.1 | 18.36 | 15.68 |

En la figura 5.16 se observa que el SoC del VE disminuye hasta 15 % durante el tramo Guayaquil – Cerritos (14.7 km después del Sector Virgen de Fátima), punto en donde el vehículo hace uso de la EVCS hasta llegar a un SoC de 83 %. En el trayecto ascendente desde Cerritos hasta el sector de Hierba Buena (7.9

km antes del mirador “Vista Linda” / Molleturo) el SoC disminuye hasta 15 %, por lo que nuevamente hace uso de la EVCS que se colocaría en este sitio. Finalmente, el VE llega a su destino final habiendo consumido 15.58 kWh y con un SoC del 25 %.

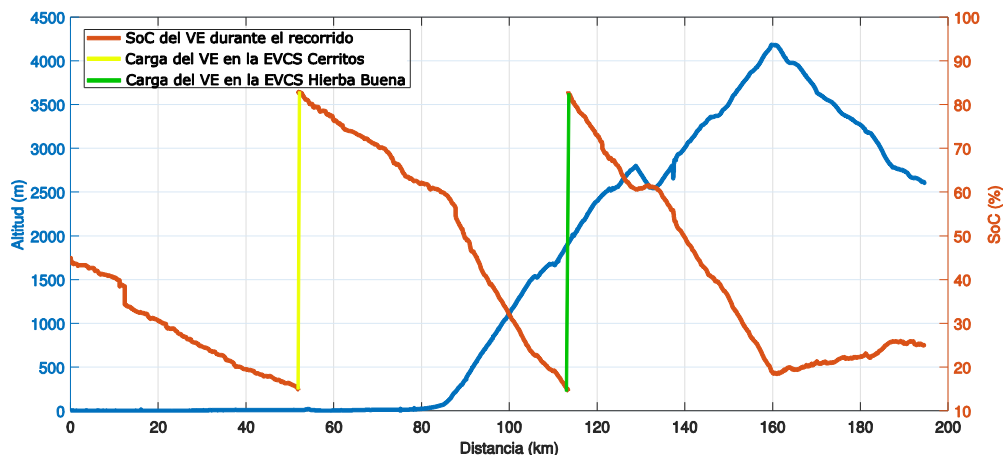


Figura 5.16: Escenario base- SoC del VE durante la ruta de regreso.

Por lo tanto, se necesitan de manera preliminar tres EVCS, una ubicada en el Virgen del Cajas, otra ubicada en el sector Hierba Buena, y la tercera en Cerritos. En la figura 5.17, se muestran el consumo de energía neta que el VE necesita realizar en cada trayecto, tanto a la ida como al regreso, para alcanzar su destino final.

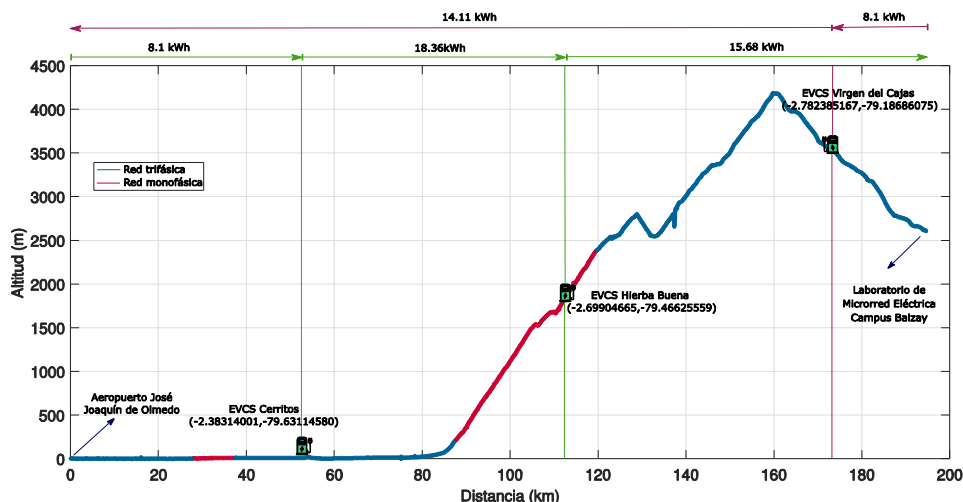


Figura 5.17: Escenario base- ubicación de EVCS.

Análisis del escenario base con respecto a los criterios propuestos

1. EVCS Virgen del Cajas

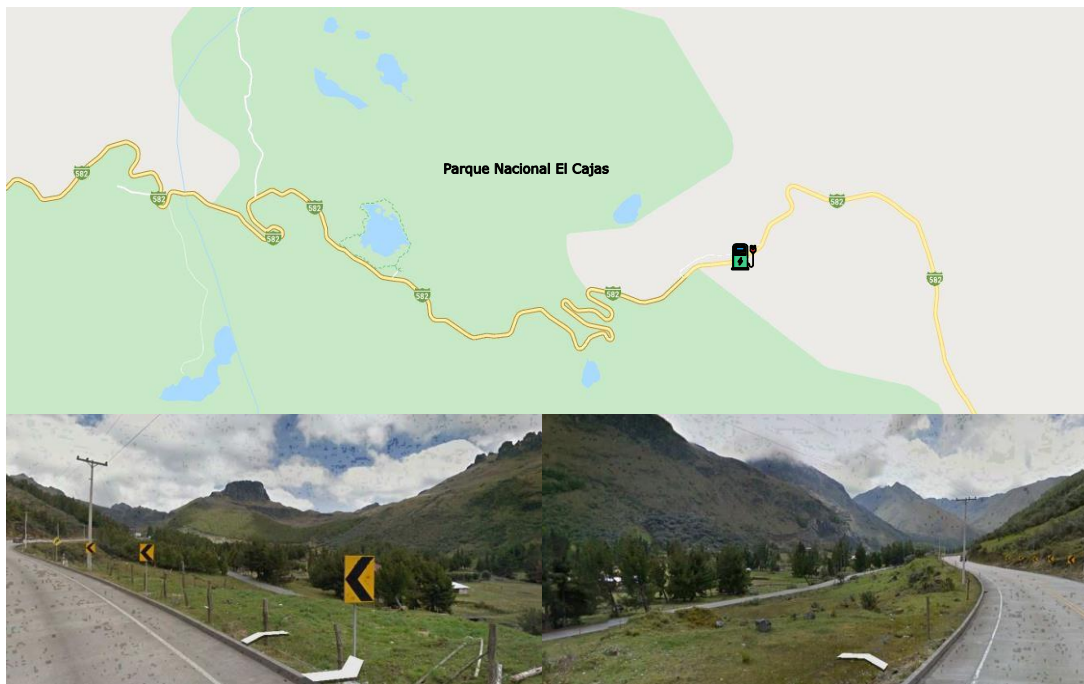


Figura 5.18: Mapa y vista 3D del lugar de ubicación de la EVCS Virgen del Cajas.

De acuerdo a la metodología propuesta, una vez validados los sitios mediante las simulaciones del consumo energético del VE, se procede a analizar el factor geográfico y de carretera, como se muestra a continuación:

- **Factores geográficos y de carretera:** la ubicación de esta estación se encuentra en el Santuario de la Virgen del Cajas, en la provincia del Azuay, con coordenadas $(-2.782385167, -79.18686075)$ a una altura de 3622 m.s.n.m.

Con base en la información suministrada por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), el estado de la red vial se considera bueno [139]. Como se observa en la figura 5.18, esta ubicación existe disponibilidad de terrenos planos para el emplazamiento de la EVCS, además de ubicarse en un sitio donde no existen deslizamientos de tierras y acantilados, por lo que cumple con las distancias mínimas explicadas en el paso 2.



A continuación, se procede a realizar la ponderación de este factor en base a los indicadores propuestos en el paso 3, el cual se presentan en la tabla 5.23, en donde se observa que el porcentaje de viabilidad del sitio es mayor al 12 % propuesto en este estudio, por lo que se procede a realizar el análisis del factor ambiental.

- **Factores ambientales:** la ubicación se encuentra cerca del Parque Nacional El Cajas, por lo que se tiene un clima de tipo páramo andino con temperaturas que oscilan entre los -2 a 18 °C y en donde se presentan frecuentes heladas, lloviznas, neblina y días de intenso sol [156]. Por lo tanto, el sitio cumple con límite mínimo de 4 % para este factor, por lo que se realiza el análisis de los factores restantes de acuerdo a la metodología propuesta, como se presenta en la tabla 5.23.
- **Factores eléctricos:** en la Tabla 5.15 y en la Figura 5.7 se observa que la ubicación de esta estación se encuentra dentro del área de concesión de la E.E.R.C.S, en donde existe suministro de red eléctrica trifásica en media tensión a 22 kV a través del alimentador 0527, por lo que cumple con el criterio de disponibilidad de red eléctrica planteado en este estudio para estaciones de carga rápida.
- **Factores sociales:** la EVCS se encuentra ubicada en una zona en donde existe red eléctrica para alumbrado público, además existen negocios comerciales como restaurantes, casas y sitios turísticos como el Santuario de la Virgen del Cajas, por lo que esta zona se considera con gran potencial para la implementación de la estación. Además, esta ubicación cumple con la distancia mínima de seguridad, que garantiza la visibilidad de la EVCS para para los conductores en ambos sentidos de la vía.
- **Factor económico:** para el análisis económico se realiza un presupuesto referencial que comprende la implementación de la EVCS, teniendo en cuenta que se toma la acometida en medio voltaje desde un poste con red trifásica en medio voltaje existente. Este presupuesto se muestra en el Anexo

#7 y fue elaborado junto con el Ing. Walter Dután Amay, docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca.

Tabla 5.23: Evaluación de la ubicación de la EVCS – Virgen del Cajas.

| Ponderación de factores | | Sumatoria | % de viabilidad del sitio |
|--|-----|-----------|---------------------------|
| Factor geográfico y de carretera ($\geq 12\%$) | | | |
| Distancia mínima | 1 | 3 | 24 % |
| Disponibilidad de terreno | 1 | | |
| Estado de la red vial | 1 | | |
| Factor ambiental ($\geq 4\%$) | | | |
| Áreas protegidas | 1 | 1 | 8 % |
| Factor eléctrico | | | |
| Disponibilidad de red eléctrica | 1 | 2 | 20 % |
| Calidad de energía | 1 | | |
| Factor económico | | | |
| Costo de construcción de la estación de carga | 0.5 | 0.5 | 8 % |
| Factor social | | | |
| Distancias mínimas de seguridad EVCS | 1 | 2.5 | 7.5 % |
| Servicio de alumbrado público | 1 | | |
| Zona poblada | 0 | | |
| Actividades comerciales | 0.5 | | |
| Σ Parcial sobre el 80 % | | | 67.5 % |

2. EVCS Hierba Buena

De acuerdo a la metodología propuesta se procede realizar el análisis de esta ubicación, como se muestra a continuación.

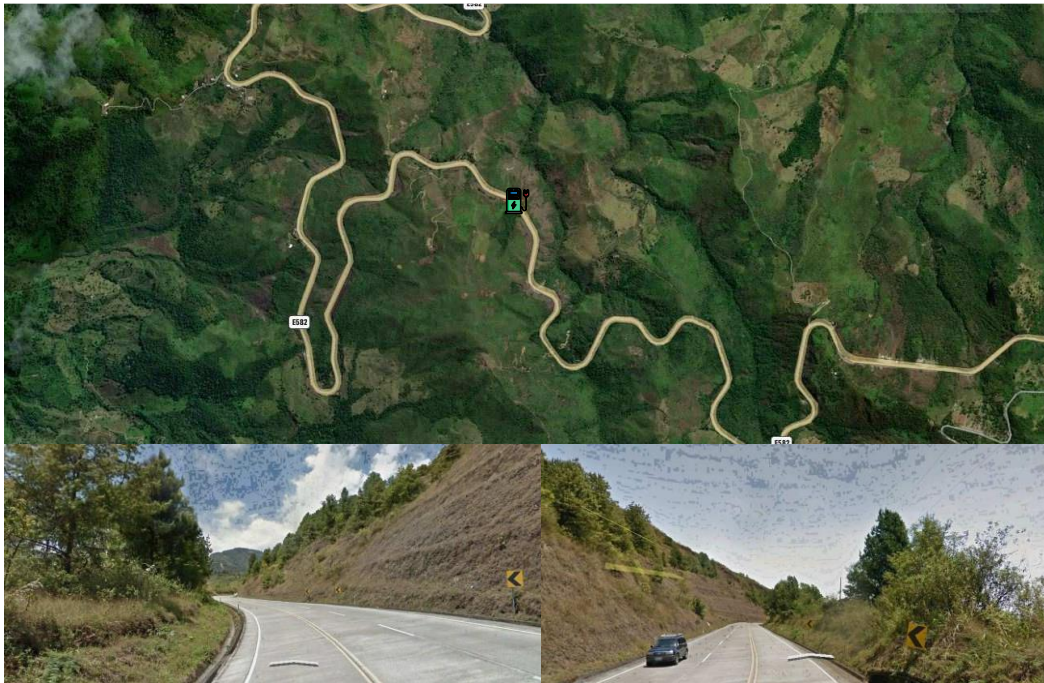


Figura 5.19: Vista satelital y 3D del lugar de ubicación de la EVCS Hierba Buena.

- **Factores geográficos y de carretera:** la EVCS se encuentra ubicada en el sector de Hierba Buena en la provincia del Azuay, con coordenadas (-2.69904665,-79.46625559), en una zona montañosa a 1918 m.s.n.m.

De acuerdo a la inspección realizada en campo y en base a la información suministrada por el MTOP, el estado de la red vial se considera “aceptable” [139], debido a que existen frecuentes derrumbes en los km 84, 88 y 91 de la vía [157], los cuales se encuentran dentro del área de influencia de ubicación de la estación de carga. En la figura 5.19 se puede observar que no existe disponibilidad de terreno, además de no cumplirse con los requerimientos de las distancias mínimas para el emplazamiento de una EVCS

Por lo tanto, en la tabla 5.24 se presenta la ponderación de este factor en base a los indicadores propuestos en el paso 3, evidenciando que no se cumple con una ponderación mayor o igual al 12 %, razón por la cual se debería realizar el análisis de un nuevo escenario realizando la reubicación de esta estación.

Tabla 5.24: Evaluación del factor geográfico y de carretera de la ubicación de la EVCS – Hierba Buena.

| Ponderación de factores | | Sumatoria | % de viabilidad del sitio |
|--|---|-----------|---------------------------|
| Factor geográfico y de carretera ($\geq 12\%$) | | | |
| Distancia mínima | 0 | 1 | 8 % |
| Disponibilidad de terreno | 0 | | |
| Estado de la red vial | 1 | | |

Como se muestra en la tabla 5.24, para esta ubicación se obtiene un porcentaje de viabilidad de 8 %, el cual está por debajo del valor establecido en este análisis, por lo que se descarta esta ubicación y no se realiza el análisis los demás factores de acuerdo a la metodología propuesta, razón por la cual se debería realizar el análisis de un nuevo escenario realizando la reubicación de esta estación.

3. EVCS Cerritos

De acuerdo a la metodología propuesta se procede realizar el análisis de esta ubicación, como se muestra a continuación.



Figura 5.20: Vista satelital y 3D del lugar de ubicación de la EVCS Cerritos.



- **Factores geográficos y de carretera:** la EVCS se encuentra ubicada en la comunidad de Cerritos, 14.7 kilómetros después de la Parroquia de Virgen de Fátima en el cantón Yaguachi de la provincia del Guayas, con coordenadas (-2.38314001,-79.63114580), a 13 m.s.n.m.

De acuerdo a la inspección realizada en campo y por datos del MTOP, el estado de la red vial en este tramo es bueno y está exento de derrumbes o deslizamientos, por lo que no existe ninguna restricción en cuanto a la vía para la ubicación de la estación [139].

Como se observa en la figura 5.20, existe la disponibilidad de terreno suficiente en ambos lados de la vía para el emplazamiento de la estación en este punto, además de cumplir con la distancia mínima de 50 metros.

En la tabla 5.25, se presentan los resultados de la ponderación del factor geográfico y de carretera, obteniendo un porcentaje de viabilidad mayor al 12 %, por lo que se continúa con el análisis del factor ambiental.

- **Factores ambientales:** esta ubicación presenta un clima lluvioso tropical, con una temperatura promedio de 25 °C [158]. En este sector no existe ninguna zona protegida que represente alguna restricción para la ubicación de la EVCS, por lo que cumple con el porcentaje mínimo establecido para seguir con el análisis de los factores restantes, como se muestra en la tabla 5.25.
- **Factores eléctricos:** en la Tabla 5.15 y en la Figura 5.7, se observa que la ubicación de esta estación se encuentra dentro del área de concesión de CNEL EP – Milagro, en donde existe suministro de red eléctrica trifásica en media tensión a 13.8 kV a través del alimentador DMLA-015, por lo que la ubicación cumple con el criterio de disponibilidad de red eléctrica planteado en este estudio para estaciones de carga rápida.
- **Factores sociales:** la EVCS está ubicada en un sector donde la vía es recta, por lo que cumple con las distancias de seguridad explicadas anteriormente. Además, en esta zona existen viviendas, locales comerciales, y dispone de

servicio de alumbrado público, por lo este sector no se considera peligroso para la ubicación de la estación.

- **Factor económico:** el análisis de costos de construcción se realizó teniendo en cuenta que la acometida en medio voltaje se toma desde un poste con red trifásica en medio voltaje existente. El presupuesto referencial se muestra en el Anexo #7.

Tabla 5.25: Evaluación de la ubicación de la EVCS – Cerritos.

| Ponderación de factores | | Sumatoria | % de viabilidad del sitio |
|--|-----|-----------|---------------------------|
| Factor geográfico y de carretera ($\geq 12\%$) | | | |
| Distancia mínima | 1 | 3 | 24 % |
| Disponibilidad de terreno | 1 | | |
| Estado de la red vial | 1 | | |
| Factor ambiental ($\geq 4\%$) | | | |
| Áreas protegidas | 1 | 1 | 8 % |
| Factor eléctrico | | | |
| Disponibilidad de red eléctrica | 1 | 2 | 20 % |
| Calidad de energía | 1 | | |
| Factor económico | | | |
| Costo de construcción de la estación de carga | 0.5 | 0.5 | 8 % |
| Factor social | | | |
| Distancias mínimas de seguridad EVCS | 1 | 3.5 | 10.5 % |
| Servicio de alumbrado público | 1 | | |
| Zona poblada | 0.5 | | |
| Actividades comerciales | 1 | | |
| Σ Parcial sobre el 80% | | | 70.5 |

De acuerdo al análisis realizado para cada una de las ubicaciones del escenario base, la ubicación de Hierba Buena no es un sitio viable para la implementación de EVCS. Además, en función de la caracterización de la ruta

de estudio y a la figura 5.17, en donde se muestra la disponibilidad de la red eléctrica de media tensión en la carretera, se puede mencionar que se presenta una condición crítica en el trayecto de ascenso Tamarindo – 12 km antes de Molleturo, debido a que es una zona con topografía montañosa, con poca disponibilidad de terreno, desolada, y carente de red eléctrica de media tensión trifásica, por lo que en la selección de nuevos escenarios se debe evitar la ubicación de las EVCS en este tramo de la carretera para garantizar sitios con mejores características; sin embargo, las ubicaciones de las EVCS Virgen del Cajas y Cerritos pueden ser consideradas en otros escenarios, ya que son sitios viables para el emplazamiento de las estaciones. Por lo tanto, se proponen once escenarios a partir del escenario base, con diferentes SoC en el VE, los cuales se presentan a continuación.

5.3.8.3. Escenario 1

- **Consideración:** tanto para el recorrido de ida como de regreso (Cuenca ⇌ Guayaquil) el VE parte desde cualquiera de las dos ciudades con SoC del 65 % (capacidad útil: 50 %).

En la figura 5.21 se muestra las ubicaciones de las estaciones de carga, junto con el consumo de energía neta, para los recorridos en ambos sentidos.

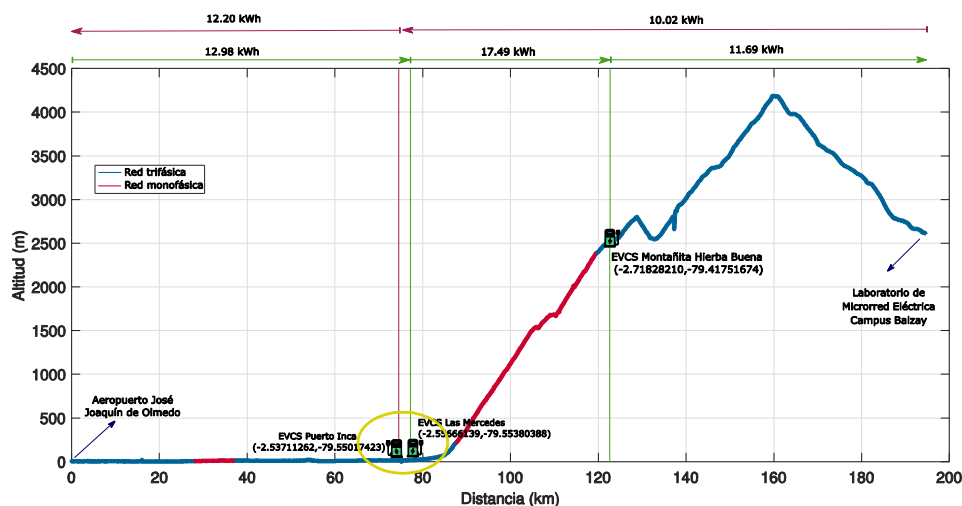


Figura 5.21: Escenario 1 - ubicaciones de las EVCS.

En las tablas 5.26 y 5.27, se presentan los resultados finales del proceso de ponderación para el escenario 1, los cuales se realizaron siguiendo la misma

metodología aplicada en el escenario base. El proceso de ponderación se detalla en el Anexo #8.

Tabla 5.26: Ponderación promedio del escenario 1.

| EVCS | Escenario 1 |
|---|----------------|
| Las Mercedes | 69 % |
| Restaurante Montañita Hierba Buena | 58 % |
| Puerto Inca | 72 % |
| Ponderación promedio de factores | 66.33 % |

Tabla 5.27: Ponderación total del escenario 1.

| | Porcentaje de viabilidad por escenario (%) |
|---|--|
| Ponderación promedio de factores | 66.33 % |
| Factor de simulación | 11.66 % |
| \sum <i>Total</i> | 77.99 % |

De los resultados obtenidos, la ubicación de la EVCS Montañita Hierba Buena tiene el menor porcentaje de viabilidad con respecto a las otras ubicaciones obtenidas en este escenario; además, la EVCS Puerto Inca y las Mercedes están cercanas entre sí, por lo que se estaría sobredimensionando la red de infraestructura de carga en este sector (ver figura 5.21). Por lo tanto, se plantea un nuevo escenario en donde se reubica la EVCS Montañita Hierba Buena y se elimina la EVCS Las Mercedes debido a que la ubicación de la EVCS Puerto Inca tiene una mejor ponderación.

5.3.8.4. Escenario 2

- **Consideración:** tanto para el recorrido de ida como de regreso (Cuenca \rightleftharpoons Guayaquil) el VE parte desde cualquiera de las dos ciudades con SoC del 65 % (capacidad útil: 50 %) / modificación del escenario 1.

Los valores energía neta consumida, entre las ubicaciones de las estaciones propuestas se presentan en la figura 5.22.

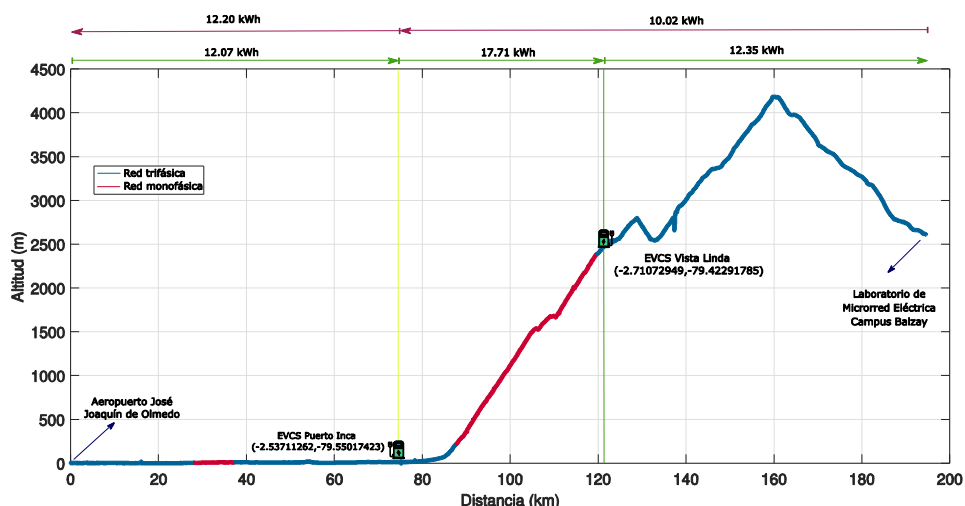


Figura 5.22: Escenario 2 - ubicaciones de las EVCS.

El proceso de ponderación para este escenario, se detalla en el Anexo #9 y los resultados finales se presentan en las tablas 5.28 y 5.29.

Tabla 5.28: Ponderación promedio del escenario 2.

| EVCS | Escenario 2 |
|---|----------------|
| Puerto Inca | 72 % |
| Vista Linda | 59.5 % |
| Ponderación promedio de factores | 65.75 % |

Tabla 5.29: Ponderación total del escenario 2.

| | Porcentaje de viabilidad por escenario (%) |
|---|--|
| Ponderación promedio de factores | 65.75 % |
| Factor de simulación | 15.5 % |
| Σ Total | 81.25 % |

5.3.8.5. Escenario 3

- **Consideración:** tanto para el recorrido de ida como de regreso (Cuenca ⇌ Guayaquil) el VE parte desde cualquiera de las dos ciudades con SoC del 75 % (capacidad útil: 60 %).

Los valores energía neta consumida, entre las ubicaciones de las estaciones propuestas se presentan en la figura 5.23.

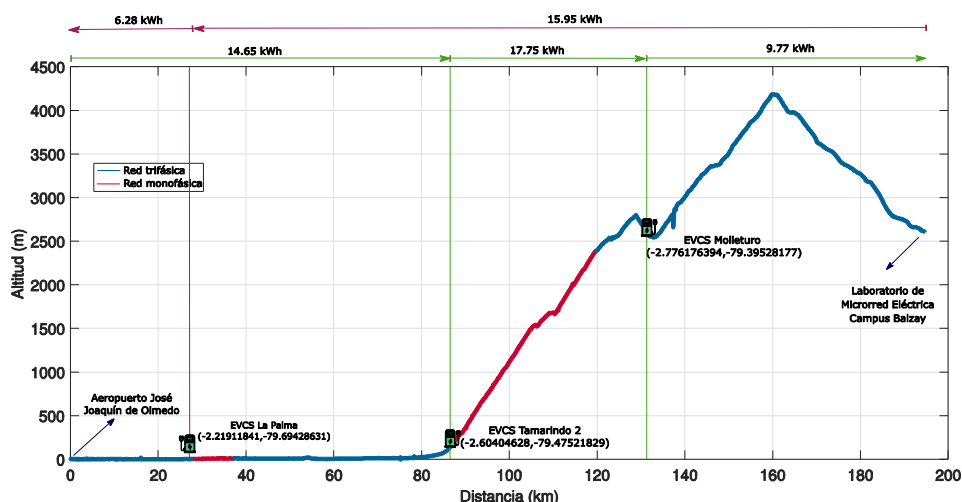


Figura 5.23: Escenario 3 - ubicaciones de las EVCS.

El proceso de ponderación para este escenario, se detalla en el Anexo #10 y los resultados finales se presentan en las tablas 5.30 y 5.31.

Tabla 5.30: Ponderación promedio del escenario 3.

| EVCS | Escenario 3 |
|---|----------------|
| La Palma | 69 % |
| Tamarindo 2 | 69 % |
| Molleturo | 58 % |
| Ponderación promedio de factores | 65.33 % |

Tabla 5.31: Ponderación total del escenario 3.

| | Porcentaje de viabilidad por escenario (%) |
|---|--|
| Ponderación promedio de factores | 65.33 % |
| Factor de simulación | 4.33 % |
| Σ Total | 69.66 % |

A partir de los resultados obtenidos, se plantea un nuevo escenario en donde se reubica la EVCS Tamarindo 2 y la EVCS Molleturo, debido a que existen sitios cercanos a estas ubicaciones que presentan mejores características.

5.3.8.6. Escenario 4

- **Consideración:** tanto para el recorrido de ida como de regreso (Cuenca ⇌ Guayaquil) el VE parte desde cualquiera de las dos ciudades con SoC del 75 % (capacidad útil: 60 %) / modificación del escenario 3.

En la figura 5.24 se muestra las ubicaciones de las estaciones de carga, junto con el consumo de energía neta, para los recorridos en ambos sentidos.

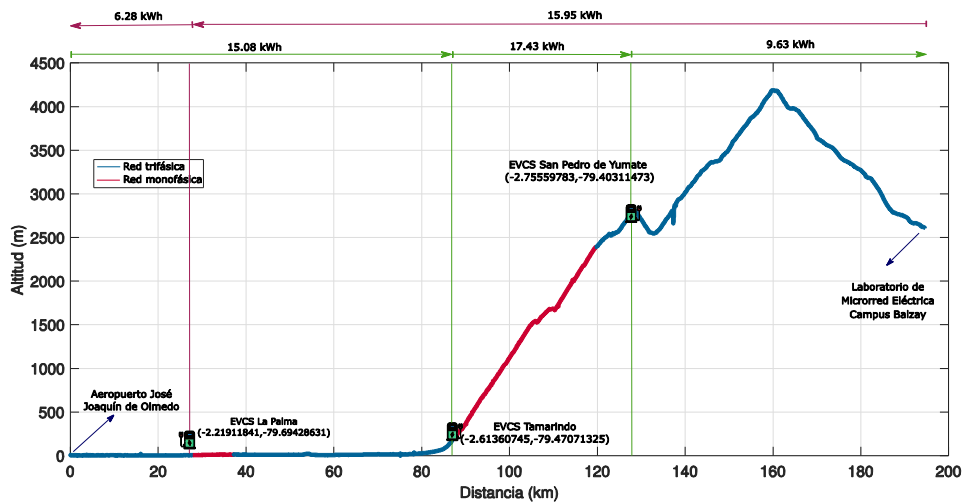


Figura 5.24: Escenario 4 - ubicaciones de las EVCS.

En las tablas 5.32 y 5.33, se presentan los resultados finales del proceso de ponderación para el escenario 4. El proceso de ponderación se detalla en el Anexo #11.

Tabla 5.32: Ponderación promedio del escenario 4.

| EVCS | Escenario 4 |
|---|----------------|
| La Palma | 69 % |
| Tamarindo | 70.5 % |
| San Pedro de Yumate | 62.5 % |
| Ponderación promedio de factores | 67.33 % |

Tabla 5.33: Ponderación total del escenario 4.

| | Porcentaje de viabilidad por escenario (%) |
|---|--|
| Ponderación promedio de factores | 67.33 % |
| Factor de simulación | 4.33 % |
| \sum Total | 71.66 % |

5.3.8.7. Escenario 5

- **Consideración:** El VE inicia el recorrido desde Cuenca con un SoC del 100 % (capacidad útil: 85 %), y parte desde Guayaquil con un SoC del 71 % (capacidad útil: 56 %)

En la figura 5.25 se muestra las ubicaciones de las estaciones de carga, junto con el consumo de energía neta, para los recorridos en ambos sentidos.

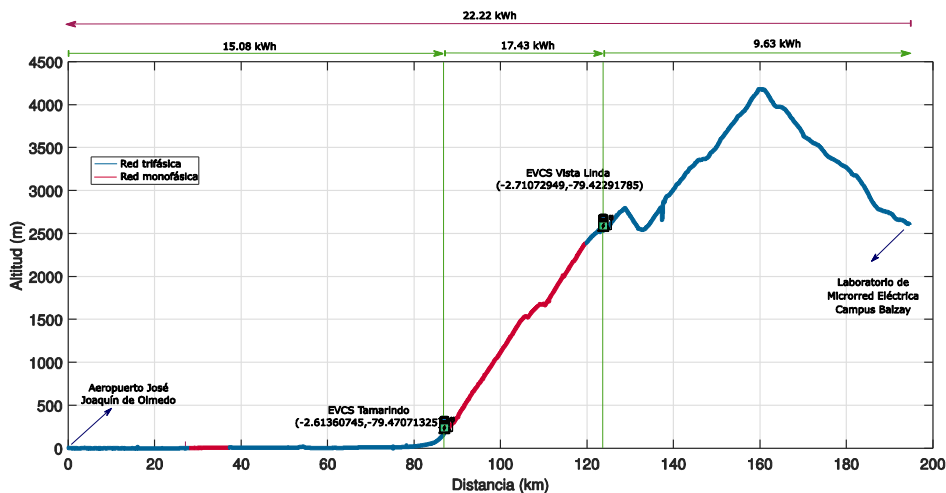


Figura 5.25: Escenario 5 - ubicaciones de las EVCS.

En las tablas 5.34 y 5.35, se presentan los resultados finales del proceso de ponderación para el escenario 5. El proceso de ponderación se detalla en el Anexo #12.

Tabla 5.34: Ponderación promedio del escenario 5.

| EVCS | Escenario 5 |
|---|-------------|
| Tamarindo | 70.5 % |
| Vista Linda | 59.5 % |
| Ponderación promedio de factores | 65 % |

Tabla 5.35: Ponderación total del escenario 5.

| | Porcentaje de viabilidad por escenario (%) |
|---|--|
| Ponderación promedio de factores | 65 % |
| Factor de simulación | 8.5 % |
| Σ Total | 73.5 % |

5.3.8.8. Escenario 6

- **Consideración:** El VE inicia el recorrido desde Cuenca con un SoC del 100 % (capacidad útil: 85 %), y parte desde Guayaquil con un SoC del 71 % (capacidad útil: 56 %) / modificación del escenario 5.

En la figura 5.26 se muestra las ubicaciones de las estaciones de carga, junto con el consumo de energía neta, para los recorridos en ambos sentidos.

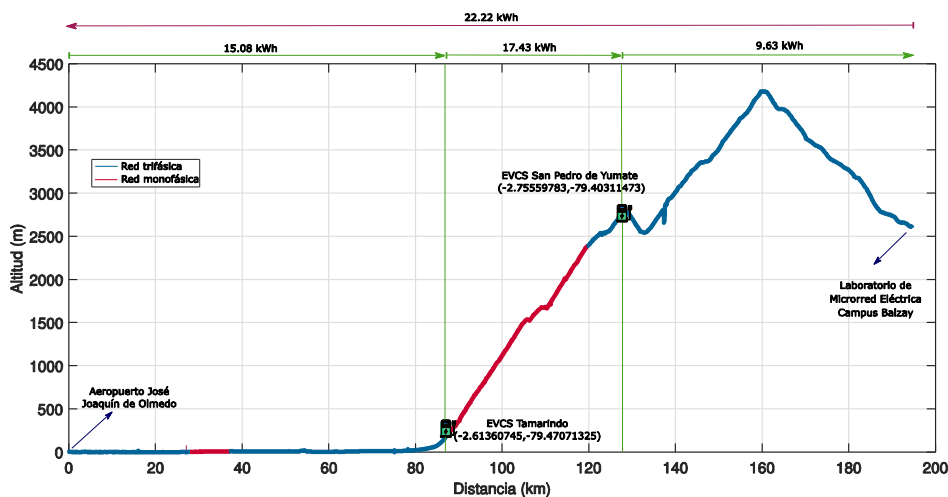


Figura 5.26: Escenario 6 - ubicaciones de las EVCS.

En las tablas 5.36 y 5.37, se presentan los resultados finales del proceso de ponderación para el escenario 6. El proceso de ponderación se detalla en el Anexo #13.

Tabla 5.36: Ponderación promedio del escenario 6.

| EVCS | Escenario 6 |
|---|---------------|
| Tamarindo | 70.5 % |
| San Pedro de Yumate | 62.5 % |
| Ponderación promedio de factores | 66.5 % |

Tabla 5.37: Ponderación total del escenario 6.

| | Porcentaje de viabilidad por escenario (%) |
|---|--|
| Ponderación promedio de factores | 66.5 % |
| Factor de simulación | 2.83 % |
| Σ Total | 69.33 % |

5.3.8.9. Escenario 7

- **Consideración:** El VE inicia del recorrido desde Cuenca con un SoC del 100 % (capacidad útil: 85 %), y parte desde Guayaquil con un SoC del 60 % (capacidad útil: 45 %).

Los valores energía neta consumida, entre las ubicaciones de las estaciones propuestas se presentan en la figura 5.27.

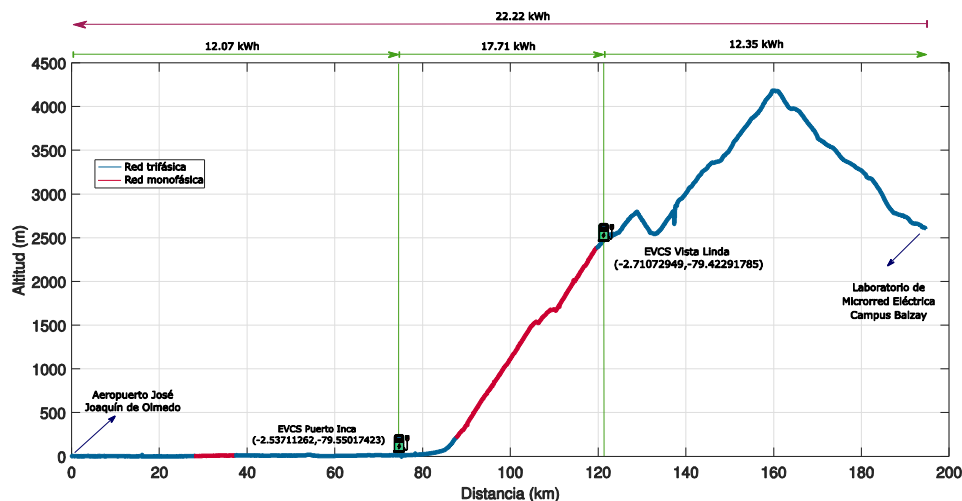


Figura 5.27: Escenario 7 - ubicaciones de las EVCS.

El proceso de ponderación para este escenario, se detalla en el Anexo #14 y los resultados finales se presentan en las tablas 5.38 y 5.39.

Tabla 5.38: Ponderación promedio del escenario 7.

| EVCS | Escenario 7 |
|---|----------------|
| Puerto Inca | 72 % |
| Vista Linda | 59.5 % |
| Ponderación promedio de factores | 65.75 % |

Tabla 5.39: Ponderación total del escenario 7.

| | Porcentaje de viabilidad por escenario (%) |
|---|--|
| Ponderación promedio de factores | 65.75 % |
| Factor de simulación | 8.16 % |
| Σ Total | 73.91 % |

5.3.8.10. Escenario 8

- **Consideración:** El VE inicia el recorrido desde Cuenca con un SoC del 45 % (capacidad útil: 30 %), y parte desde Guayaquil con un SoC del 65 % (capacidad útil: 50 %).

Los valores energía neta consumida, entre las ubicaciones de las estaciones propuestas se presentan en la figura 5.28.

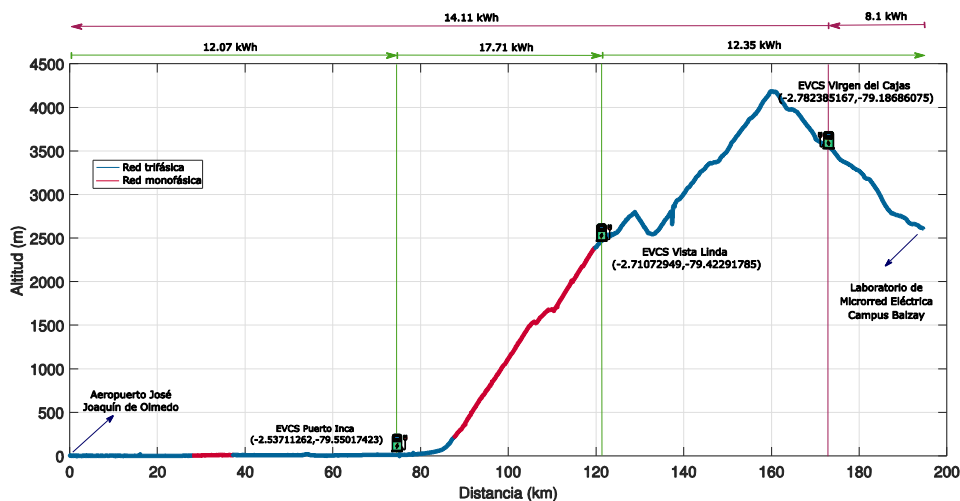


Figura 5.28: Escenario 8 - ubicaciones de las EVCS.

El proceso de ponderación para este escenario, se detalla en el Anexo #15 y los resultados finales se presentan en las tablas 5.40 y 5.41.

Tabla 5.40: Ponderación promedio del escenario 8.

| EVCS | Escenario 8 |
|---|----------------|
| Virgen del Cajas | 67.5 % |
| Puerto Inca | 72 % |
| Vista Linda | 59.5 % |
| Ponderación promedio de factores | 66.33 % |

Tabla 5.41: Ponderación total del escenario 8.

| | Porcentaje de viabilidad por escenario (%) |
|---|--|
| Ponderación promedio de factores | 66.33 % |
| Factor de simulación | 15.33 % |
| Σ Total | 81.66 % |

5.3.8.11. Escenario 9

- **Consideración:** El VE inicial el recorrido desde Cuenca con un SoC del 50 % (capacidad útil: 35 %), y parte desde Guayaquil con un SoC del 65 % (capacidad útil: 50 %) / modificación escenario 8.

En la figura 5.29 se muestra las ubicaciones de las estaciones de carga, junto con el consumo de energía neta, para los recorridos en ambos sentidos.

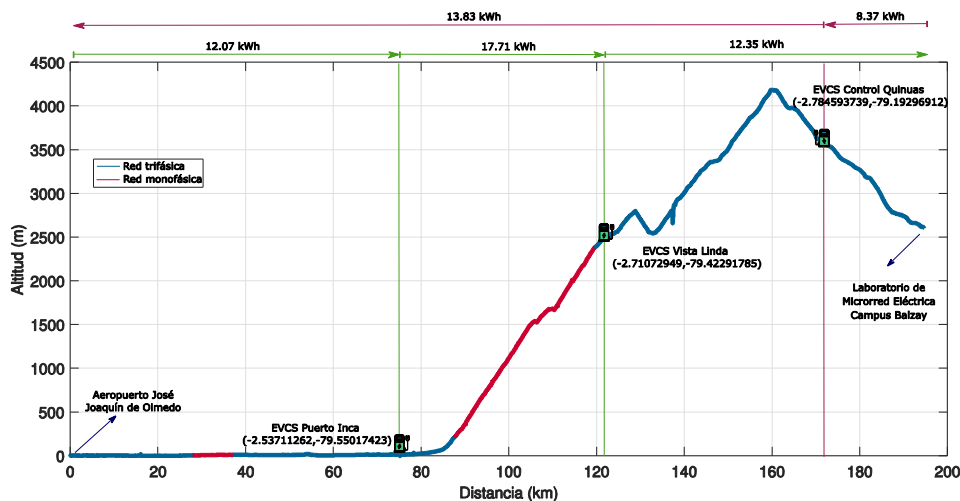


Figura 5.29: Escenario 9 - ubicaciones de las EVCS.

En las tablas 5.42 y 5.43, se presentan los resultados finales del proceso de ponderación para el escenario 9. El proceso de ponderación se detalla en el Anexo #16.

Tabla 5.42: Ponderación promedio del escenario 9.

| EVCS | Escenario 9 |
|---|---------------|
| Control Quinuas (El Cajas) | 65 % |
| Puerto Inca | 72 % |
| Vista Linda | 59.5 % |
| Ponderación promedio de factores | 65.5 % |

Tabla 5.43: Ponderación total del escenario 9.

| | Porcentaje de viabilidad por escenario (%) |
|---|--|
| Ponderación promedio de factores | 65.5 % |
| Factor de simulación | 15.33 % |
| Σ Total | 80.83 % |

5.3.8.12. Escenario 10

- **Consideración:** tanto para el recorrido de ida como de regreso (Cuenca ⇌ Guayaquil) el VE parte desde cualquiera de las dos ciudades con SoC del 45 % (capacidad útil: 30 %).

Los valores energía neta consumida, entre las ubicaciones de las estaciones propuestas se presentan en la figura 5.30.

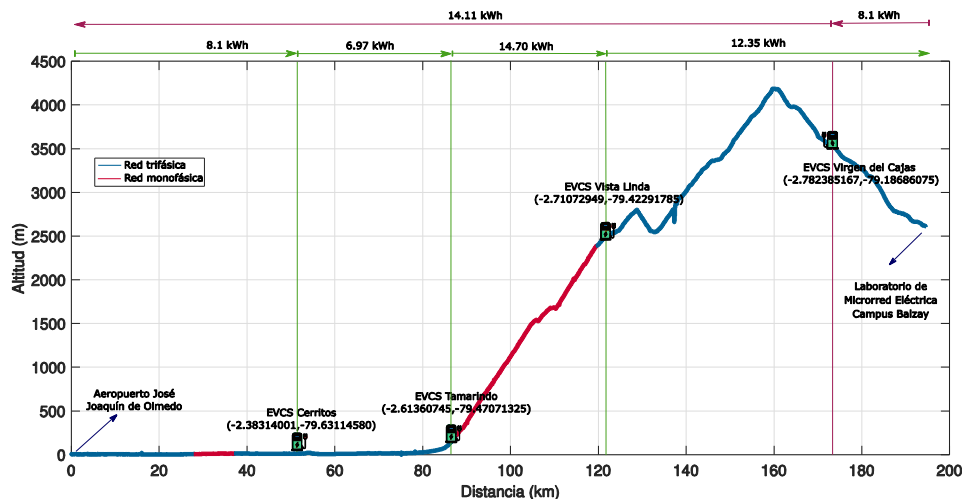


Figura 5.30: Escenario 10 - ubicaciones de las EVCS.

El proceso de ponderación para este escenario, se detalla en el Anexo #17 y los resultados finales se presentan en las tablas 5.44 y 5.45.

Tabla 5.44: Ponderación promedio del escenario 10.

| EVCS | Escenario 10 |
|---|--------------|
| Virgen del Cajas | 67.5 % |
| Cerritos | 70.5 % |
| Tamarindo | 70.5 % |
| Vista Linda | 59.5 % |
| Ponderación promedio de factores | 67 % |

Tabla 5.45: Ponderación promedio del escenario 10.

| | Porcentaje de viabilidad por escenario (%) |
|---|--|
| Ponderación promedio de factores | 67 % |
| Factor de simulación | 16.5 % |
| Σ Total | 83.5 % |

5.3.8.13. Escenario 11

- **Consideración:** tanto para el recorrido de ida como de regreso (Cuenca ⇌ Guayaquil) el VE parte desde cualquiera de las dos ciudades con SoC del 45 % (capacidad útil: 30 %) / modificación escenario 10.

Los valores energía neta consumida, entre las ubicaciones de las estaciones propuestas se presentan en la figura 5.31.

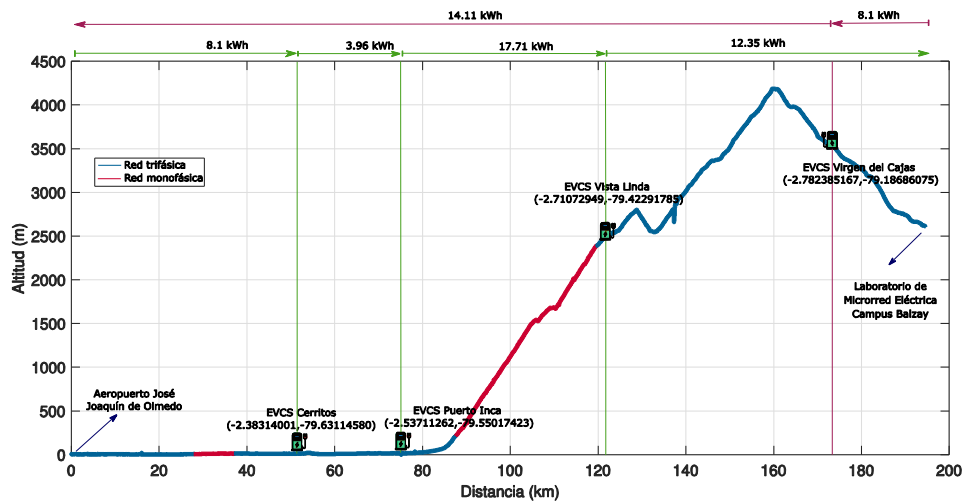


Figura 5.31: Escenario 11 - ubicaciones de las EVCS.

El proceso de ponderación para este escenario, se detalla en el Anexo #18 y los resultados finales se presentan en las tablas 5.46 y 5.47.

Tabla 5.46: Ponderación promedio del escenario 11.

| EVCS | Escenario 11 |
|---|----------------|
| Virgen del Cajas | 67.5 % |
| Cerritos | 70.5 % |
| Puerto Inca | 72 % |
| Vista Linda | 59.5 % |
| Ponderación promedio de factores | 67.37 % |

Tabla 5.47: Ponderación total del escenario 11.

| | Porcentaje de viabilidad por escenario (%) |
|---|--|
| Ponderación promedio de factores | 67.37 % |
| Factor de simulación | 14.75 % |
| Σ Total | 82.12 % |

5.3.9. Paso 9 – Análisis de resultados

A continuación, en la tabla 5.48, se presentan los resultados finales obtenidos sobre el 100 % de cada uno de los escenarios.

Tabla 5.48: Cuadro resumen de los escenarios analizados.

| Consideraciones | Comentario | Escenarios | Ubicación de las EVCS | % <i>viabilidad</i> _{100 %} |
|---|-------------------------------|------------|--|--|
| El VE inicia el viaje desde cualquiera de las dos ciudades con SoC del 45 % (capacidad útil: 30 %). | - | Base | <ul style="list-style-type: none"> Virgen del Cajas. Hierba Buena. Cerritos. | No se obtiene el % de viabilidad ya que la ubicación EVCS Hierba Buena no cumple con el factor geográfico. |
| El VE inicia el viaje desde cualquiera de las dos ciudades con SoC del 65 % (capacidad útil: 50 %). | - | 1 | <ul style="list-style-type: none"> Las Mercedes. Puerto Inca. Montañita Hierba Buena. | 77.99 % |
| El VE inicia el viaje desde cualquiera de las dos ciudades con SoC del 65 % (capacidad útil: 50 %). | Modificación del escenario 1 | 2 | <ul style="list-style-type: none"> Puerto Inca. Vista Linda. | 81.25 % |
| El VE inicia el viaje desde cualquiera de las dos ciudades con SoC del 75 % (capacidad útil: 60 %). | - | 3 | <ul style="list-style-type: none"> La Palma. Tamarindo 2. Molleturo. | 69.66 % |
| El VE inicia el viaje desde cualquiera de las dos ciudades con SoC del 75 % (capacidad útil: 60 %). | Modificación del escenario 3 | 4 | <ul style="list-style-type: none"> La Palma. Tamarindo. San Pedro de Yumate. | 71.66 % |
| El VE inicia el viaje desde Cuenca con un SoC del 100 % (capacidad útil: 85 %), y parte desde Guayaquil con un SoC del 71 % (capacidad útil: 56 %). | - | 5 | <ul style="list-style-type: none"> Tamarindo. Vista Linda. | 73.50 % |
| El VE inicia el viaje desde Cuenca con un SoC del 100 % (capacidad útil: 85 %), y parte desde Guayaquil con un SoC del 71 % (capacidad útil: 56 %). | Modificación del escenario 5 | 6 | <ul style="list-style-type: none"> Tamarindo. San Pedro de Yumate. | 69.33 % |
| El VE sale desde Cuenca con un SoC del 100 % (capacidad útil: 85 %), y parte desde Guayaquil con un SoC del 60 % (capacidad útil: 45 %). | - | 7 | <ul style="list-style-type: none"> Puerto Inca. Vista Linda. | 73.91 % |
| El VE inicia el viaje desde Cuenca con un SoC del 45 % (capacidad útil: 30 %), y parte desde Guayaquil con un SoC del 65 % (capacidad útil: 50 %). | - | 8 | <ul style="list-style-type: none"> Virgen del Cajas. Vista Linda. Puerto Inca. | 81.66 % |
| El VE inicia el viaje desde Cuenca con un SoC del 50 % (capacidad útil: 35 %), y parte desde Guayaquil con un SoC del 65 % (capacidad útil: 50 %). | Modificación del escenario 8 | 9 | <ul style="list-style-type: none"> Control Quinuas. Vista Linda. Puerto Inca. | 80.83 % |
| El VE inicia el viaje desde cualquiera de las dos ciudades con SoC del 45 % (capacidad útil: 30 %). | - | 10 | <ul style="list-style-type: none"> Virgen del Cajas. Cerritos. Tamarindo. Vista Linda. | 83.5 % |
| El VE inicia el viaje desde cualquiera de las dos ciudades con SoC del 45 % (capacidad útil: 30 %). | Modificación del escenario 11 | 11 | <ul style="list-style-type: none"> Virgen del Cajas. Cerritos. Puerto Inca. Vista Linda. | 82.12 % |



De acuerdo a las simulaciones realizadas y al análisis de cada uno de los sitios, se identificó que el tramo Tamarindo – 12 km antes de Molleturo presenta condiciones críticas para la ubicación de EVCS, debido a que no existe disponibilidad de terreno por su topografía montañosa, no existe red eléctrica de media tensión trifásica, por lo que se tendría que incurrir en gastos adicionales, además de ser una zona desolada, sin visibilidad debido a la sinuosidad de la vía y a las condiciones climatológicas (neblina); por lo que en cada uno de los escenarios propuestos se seleccionaron las ubicaciones evitando ubicar las infraestructuras de carga en este trayecto, buscando garantizar que el VE alcance cada uno de los sitios y que exista una correcta distribución de energía entre EVCS, tanto a la ida como al regreso.

Es así que, como se observa en la tabla 5.48, los escenarios 2, 8, 9, 10, 11 presentan valores mayores al 80 %, siendo las EVCS que más se repiten en estos escenarios Puerto Inca, Vista Linda y Virgen del Cajas. Estas ubicaciones son estratégicas dentro del análisis de la red de infraestructura de carga de la ruta de estudio.

Los escenarios 10 y 11 se los clasifican como escenarios robustos, debido a que cuentan con cuatro EVCS ubicadas a lo largo de la vía, las cuales garantizan que, tanto a la salida desde Cuenca como desde Guayaquil, los VE puedan alcanzar una estación con un SoC del 45 %. En estos dos escenarios, el VE necesitaría realizar tres procesos de recarga para llegar desde Guayaquil hasta Cuenca y un solo proceso de recarga en la EVCS Virgen del Cajas, si el VE realiza el viaje desde Cuenca.

Además, en la tabla 5.48 se evidencia que el escenario 10 tiene un mayor porcentaje de viabilidad con respecto al escenario 11, ya que como se observa en las figuras 5.30 y 5.31, la EVCS Cerritos se encuentra más cercana a la EVCS Puerto Inca que a la EVCS Tamarindo, por lo que en el factor de simulación se penalizó a estos dos escenarios, siendo la ponderación del escenario 11 la más crítica, ya que no existe una correcta distribución de energía entre estaciones; sin embargo, la ubicación de estas estaciones se las realizó teniendo en cuenta el consumo energético del VE a la ida como al regreso, con base en las

condiciones topográficas de la ruta de estudio, por lo que es necesaria la ubicación de una de estas dos EVCS. Por lo tanto, el escenario 10 es una opción que garantiza a los VE realizar los recorridos en ambos sentidos de la vía de forma confiable y segura, cuando se inicia el recorrido con un SoC mínimo; sin embargo, no se puede descartar el escenario 11, ya que la ubicación de la EVCS Puerto Inca es un sitio estratégico debido a la conexión entre las provincias del Azuay, Cañar y El Oro con la provincia del Guayas, por lo que una ubicación antes o después de Puerto Inca, haría perder esta conectividad que puede ser un factor decisivo para la usabilidad de la infraestructura de carga.

En la tabla 5.48, los escenarios 1, 3, 4, 8 y 9, presentan una propuesta de ubicación de tres EVCS en la ruta de estudio, siendo el escenario 8 el que tiene el mayor porcentaje de viabilidad, con un valor de 81.66 %. Este escenario se considera como una red de infraestructura de recarga media, que garantiza que el VE inicie el viaje desde Cuenca con una capacidad útil del 30 % y desde Guayaquil con una capacidad útil del 50 %.

Los escenarios 2, 5, 6 y 7 están formados por dos EVCS, siendo el escenario 2 el que tiene un mayor porcentaje de viabilidad, con un valor de 81.25 %. Este escenario se considera como una red de infraestructura mínima ya que se estaría obligando al usuario del VE a tener un mayor control del SoC o haber planificado el viaje previamente.

En el Anexo #19 se presentan las tablas con los valores de energía de carga, descarga y energía neta consumida mediante las simulaciones realizadas con una masa de 69 kg, y se verifica que el VE consume menos energía y alcanza cada una de las EVCS propuestas en el escenario 2, 8 y 10.

5.3.10. Paso 11 – Mapa de la ubicación final de las EVCS

A continuación, se presentan los mapas con las ubicaciones de las EVCS de acuerdo a la red de infraestructura de carga (robusta, media, mínima), explicada anteriormente.

- Red de infraestructura de carga robusta

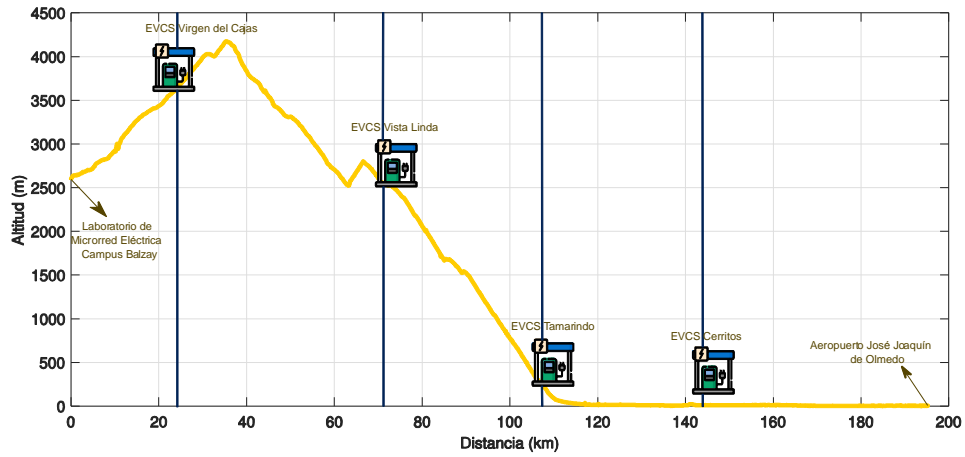


Figura 5.32: Ubicación final de EVCS para una infraestructura de carga robusta.

- Red de infraestructura de carga media

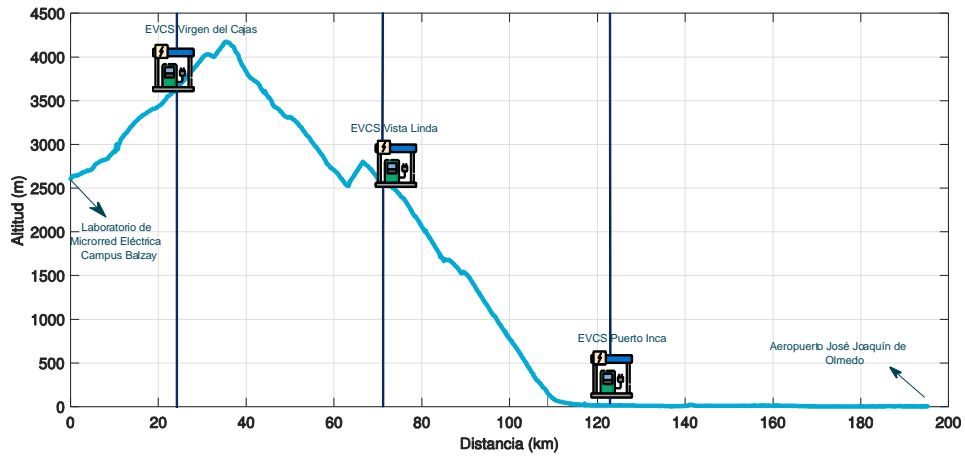


Figura 5.33: Ubicación final de EVCS para una infraestructura de carga media.

- Red de infraestructura de carga mínima

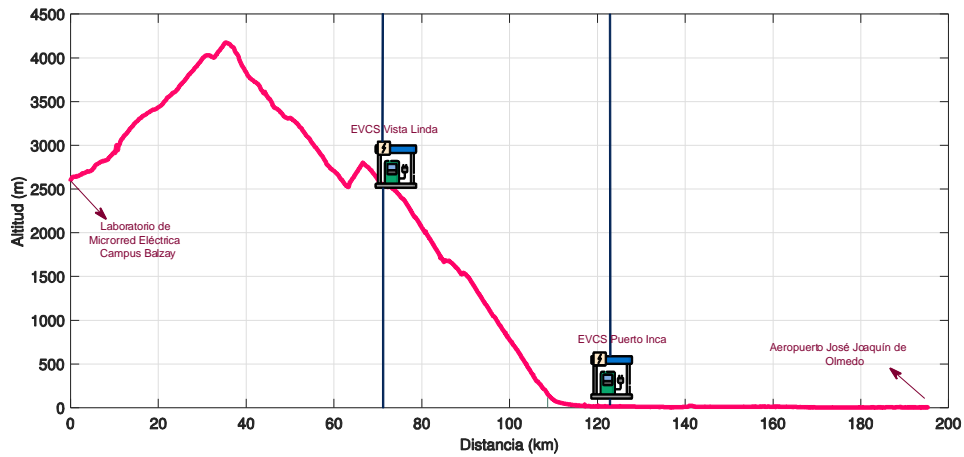


Figura 5.34: Ubicación final de EVCS para una infraestructura de carga mínima.

5.4. Conclusiones

La metodología propuesta permite identificar los sitios candidatos en donde se deben ubicar las estaciones de carga rápida en una carretera. Para identificar estas ubicaciones es importante realizar las simulaciones a partir del modelo matemático sobre el consumo energético del VE, tanto en la ruta de ida como en la de regreso debido a las condiciones topográficas de las carreteras. Para el caso de estudio (masa de 345 kg) se observó que durante el recorrido de ida (Cuenca - Guayaquil) la energía neta consumida del vehículo es de 22.22 kWh, mientras que durante el recorrido de regreso (Guayaquil - Cuenca), la energía neta consumida del VE es de 42.17 kWh, por lo que el recorrido en esta dirección es el que impone mayores condiciones para la ubicación de estaciones de carga rápida. Es así que se realiza la simulación por tramos para identificar las ubicaciones en las que el VE necesita realizar el proceso de recarga, tomando en cuenta cada una de las consideraciones propuestas en el estudio.

La metodología de ubicación de estaciones de carga se desarrolló con éxito en la ruta de estudio Cuenca – Guayaquil vía E582 a partir de la simulación del modelo matemático implementado, del análisis de los factores propuestos en el estudio y de la ponderación de cada factor para la selección final de la ubicación de las estaciones.

Con una primera simulación del modelo matemático y las consideraciones iniciales establecidas se identificaron tres posibles ubicaciones (escenario base), en el sector de Cerritos, Hierba Buena y Virgen del Cajas, y se analizó cada uno de estos sitios en base al factor geográfico y ambiental, concluyendo que en el sector de Hierba Buena no existe disponibilidad de terreno para el emplazamiento de la estación de carga, además de que existen lugares que tienen mejores prestaciones y características con respecto a los de este escenario base, por lo que se seleccionaron once nuevos escenarios, teniendo en cuenta el SoC con el que el VE sale desde la ciudad de origen.

A partir del análisis de todos los escenarios propuestos, se identificaron tres escenarios que tienen el mayor porcentaje viabilidad para la ubicación de las



EVCS, de acuerdo a la red de infraestructura de carga (robusta, media y mínima). El escenario 10 (infraestructura robusta), está conformado por cuatro EVCS (Puerto Inca, Vista Linda, Cerritos y Virgen del Cajas), por lo que este escenario ayuda a aumentar la confianza en los usuarios de los VE, reduce la “ansiedad de autonomía” y promueve el uso del VE a largas distancias. El escenario 8 (infraestructura media), el cual está formado por la EVCS Puerto Inca, Vista Linda y Virgen del Cajas, restringe al usuario iniciar el VE con un SoC mínimo para poder alcanzar la EVCS más próxima; y el escenario 2 (red mínima), con las EVCS Puerto Inca y Vista Linda, requiere una mayor planificación y control del viaje para que el VE alcance cada una de estas estaciones para poder llegar a su destino final. Sin embargo, a criterio de los autores, la selección del escenario que debe ser implementado es la red de infraestructura mínima dado que, desde el punto de vista económico, el costo inicial de la red media o robusta puede ser entre el 50 y 100 % más que la red mínima, aspecto que con la mejora continua de la autonomía de los VE podrá ser considerada como media o robusta en pocos años.

Esta metodología asegura el emplazamiento de las EVCS y una correcta distribución de energía entre dos ubicaciones de acuerdo al análisis de los factores, garantizando que los VE livianos de gama media que circulan en el país puedan realizar este viaje sin presentar inconvenientes, teniendo en consideración la autonomía y el SoC inicial del vehículo.



Capítulo 6. Caracterización de estaciones de carga rápida con salida en DC

6.1. Introducción

Las cargas conectadas en el sistema eléctrico alimentado por corriente alterna y tensiones senoidales se clasifican de acuerdo a la corriente que fluye por la carga. Estas cargas pueden ser lineales o no lineales, en donde las cargas lineales se caracterizan debido a que la forma de onda de la corriente es la misma que la forma de onda de la tensión, como por ejemplo: motores de inducción, calefactores, lámparas incandescentes, entre otros; mientras que las cargas no lineales se caracterizan porque la forma de onda de la corriente es diferente a la forma de onda de la tensión, estas cargas están presentes en aplicaciones industriales, comerciales y dentro del hogar, como pueden ser: variadores de velocidad de motores, lámparas fluorescentes, computadoras, máquinas de soldar, hornos de inducción, EVCS, entre otros.

Las EVCS están constituidas por componentes electrónicos, por lo que se comportan como cargas no lineales que pueden afectar en la calidad del suministro de distribución eléctrica y al desempeño de los equipos y/o dispositivos de la instalación; sin embargo, con el avance tecnológico, estas estaciones de carga rápida que generalmente entregan energía en DC al VE, hacen uso de un conjunto de convertidores de potencia con sistemas de corrección del factor de potencia con el fin de mejorar la calidad de energía asociada a la estación de carga.

La calidad de energía hace referencia al conjunto de características, límites y condiciones eléctricas adecuadas tanto en voltaje, corriente y frecuencia, que permiten que un equipo funcione de forma correcta y de manera continua, sin que se provoque fallas a sus componentes o a los componentes de la red de distribución [159]. Además, el término calidad de energía debe ser tomado en cuenta por tres actores principales de un sistema eléctrico de distribución: empresa de distribución, consumidor y el fabricante de los equipos.



En la norma IEEE estándar 1159-2019 “Prácticas recomendadas para la supervisión de la calidad de potencia eléctrica” [160], se definen siete categorías basadas en fenómenos electromagnéticos sobre las cuales pueden existir problemas con la calidad de la potencia eléctrica, las cuales son: distorsión de la forma de onda, transitorios, variación de V_{rms} de corta duración, variaciones de V_{rms} de larga duración, desequilibrio, fluctuaciones de tensión y variaciones de la frecuencia de la fuente de potencia [161].

Debido a que este estudio está enfocado en la implementación de estaciones de carga rápida para VE en carreteras y a que la metodología desarrollada toma en consideración el cumplimiento de los límites de calidad de energía propuestos por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL), se presenta un análisis del impacto de las estaciones de carga en la red de distribución, haciendo énfasis de manera particular en el estudio de la distorsión armónica, factor de potencia, y el comportamiento de recarga de la batería de un VE durante el funcionamiento de la estación.

6.2. Armónicos

Los armónicos son “las ondas sinusoidales de frecuencia igual a un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de 60 Hz (caso Ecuador), originadas principalmente por las características no lineales de los equipos o cargas de un sistema eléctrico” [162]. Además, las formas de onda de tensión y corriente periódicas y continuas se pueden descomponer como la suma infinita de las señales senoidales de frecuencias múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, de acuerdo al principio de una serie de Fourier, como se observa en la figura 6.1.

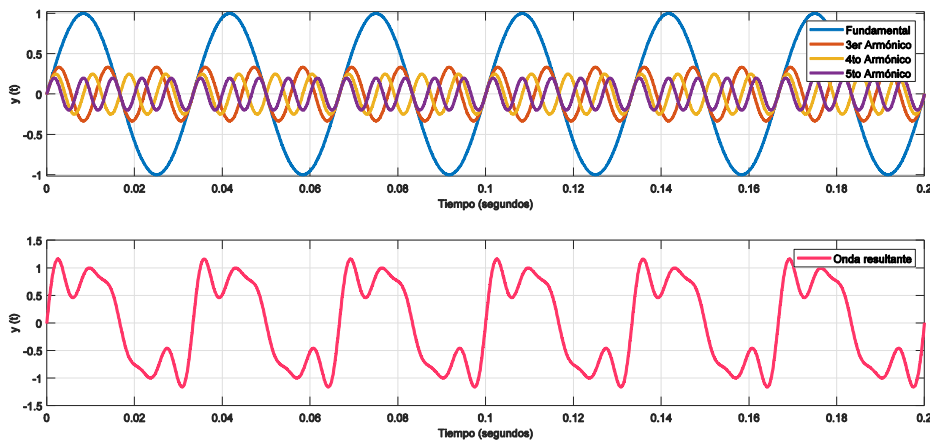


Figura 6.1: Teorema de Fourier para señales senoidales periódicas y continuas.

Los armónicos pueden clasificarse por tres parámetros: orden, frecuencia y secuencia [163], como se muestra en la tabla 6.1.

Tabla 6.1: Parámetros de los armónicos.

| Orden | Frecuencia | Secuencia |
|-------|--------------|-----------|
| 1 | 60 | + |
| 2 | 120 | - |
| 3 | 180 | 0 |
| 4 | 240 | + |
| 5 | 300 | - |
| 6 | 360 | 0 |
| -- | -- | -- |
| h | $60 \cdot h$ | -- |

Los efectos adversos causados por la presencia de armónicos en la red son: calentamiento de los conductores, calentamiento en los transformadores, interferencias electromagnéticas (vibraciones en cuadros eléctricos y transformadores y acoplamiento en redes de telecomunicaciones), mal funcionamiento de los relés de protección, entre otros. Estos efectos provocan que la vida útil y eficiencia de los equipos se vea disminuida, y en casos extremos se puede producir la destrucción de los componentes de los equipos.

6.3. Distorsión armónica

La distorsión armónica es una medida de la deformación de la onda de voltaje y de la corriente con respecto a la forma de onda senoidal pura a frecuencia fundamental [164].

Existen indicadores que permiten cuantificar y evaluar la distorsión armónica de las ondas de voltaje y corriente, los cuales son:

- **Factor de cresta:** es la relación entre el valor pico o valor máximo de corriente o tensión y el valor eficaz [165].

$$k = \frac{V_m}{V_{rms}} \quad o \quad k = \frac{I_m}{I_{rms}} \quad (6.1)$$

Para una señal senoidal, el factor de cresta es igual a $\sqrt{2}$; mientras que para una señal no senoidal, el factor de cresta puede tener valores mayores a $\sqrt{2}$, lo que da lugar a sobreintensidades puntuales de gran tamaño, que pueden dar origen a desconexiones indeseadas debido al mal funcionamiento de las protecciones [165].

- **Espectro en frecuencia:** es una representación gráfica de la amplitud de cada una de las componentes senoidales (armónicos) que integran a la señal distorsionante (orden de armónico). En la figura 6.2, la amplitud de cada componente armónico se conoce como distorsión armónica individual, la cual se define como el nivel de distorsión en porcentaje, de orden h , ya sea en voltaje o corriente, con respecto a la fundamental, como se indica en la ecuación (6.2) [165].

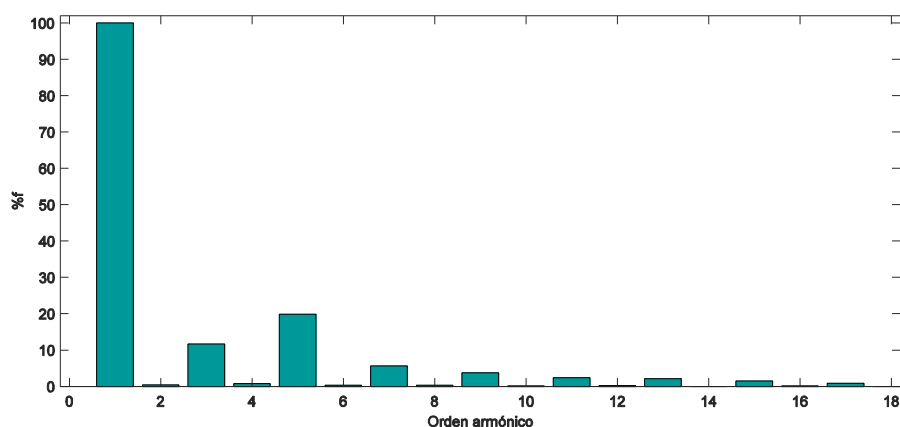


Figura 6.2: Análisis espectral.

$$V_h(\%f) = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100 \quad o \quad I_n(\%f) = \frac{I_n}{I_1} \cdot 100 \quad (6.2)$$

- **Tasa de distorsión armónica (THD):** es una medida de la relación de coincidencia de formas entre el valor eficaz del residuo armónico de una onda de tensión o corriente, y el valor de la componente fundamental (armónico de orden 1) [166].

$$THD_V(\%f) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad o \quad THD_I(\%f) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (6.3)$$

En la norma IEC 61000-2-2-2000 “Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público en baja tensión” [167], el valor de h se limita al armónico 50.

- **Distorsión de demanda total (TDD)**

La distorsión de demanda total es “la relación entre la corriente armónica y la demanda máxima de la corriente de la carga I_L ” [164], y se expresa como:

$$TDD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_L} \cdot 100 \quad (6.4)$$

Por lo general, suelen existir niveles altos de THD en condiciones de baja carga que no interfieren en la operación de los equipos debido a que la energía distorsionante que fluye también es baja, por lo que el TDD es un parámetro que permite evaluar adecuadamente el impacto de la distorsión armónica en el sistema. Los niveles máximos de distorsión armónica de corriente se encuentran en la norma IEEE estándar 519-2014 “Recomendaciones prácticas y requerimientos para el control de armónicos en los Sistemas Eléctricos de Potencia” [164].

La diferencia entre el TDD y el THD es que en el TDD , los armónicos se expresan como porcentaje de la corriente de demanda máxima de carga, mientras que en el THD el contenido armónico se expresa como porcentaje de la corriente fundamental.

- **Factor de potencia real:** “es la relación entre la potencia activa, que produce un trabajo útil, respecto a la potencia total aparente demandada a la red eléctrica” [168], como se muestra en la ecuación (6.5).

$$FP_{real} = \frac{P_{total}}{S_{total}} \quad (6.5)$$

Generalmente, el factor de potencia real de una instalación se suele confundir con el $\cos(\varphi)$ o también conocido como factor de potencia de desplazamiento, el cual se define como la relación entre la potencia activa fundamental P_1 y la potencia aparente fundamental S_1 .

$$FP_{desplazamiento} = \cos(\varphi) = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} \quad (6.6)$$

En presencia de cargas lineales el FP_{real} es igual al $FP_{desplazamiento}$, mientras que en cargas no lineales estos valores son diferentes, debido al impacto de la distorsión armónica que este tipo de cargas generan en la red eléctrica. En presencia de armónicos se emplea el FP_{real} , el cual se expresa en función del factor de potencia de distorsión, como se muestra en la ecuación (6.7).

$$FP_{real} = FP_{desplazamiento} \cdot FP_{distorsión} \quad (6.7)$$

El factor de potencia de distorsión se define como una medida de la distorsión de la corriente y voltaje debido a la no linealidad de la impedancia de la carga, por lo que se encuentra relacionado con el THD . En la práctica no se considera el THD_V , ya que por lo general sus valores son despreciables, teniendo poca influencia en el cálculo del factor de potencia de distorsión. Finalmente, tomando en cuenta esta simplificación, el factor de potencia real se expresa como se muestra en la ecuación (6.8).

$$FP_{real} = FP_{desplazamiento} \cdot FP_{distorsión} = \cos(\varphi) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}} = \frac{P_{total}}{S_{total}} \quad (6.8)$$

6.4. Criterios y normativas

▪ Criterios

En el documento “Detección y filtrado de armónicos” de Schneider Electric [165], se presentan los siguientes criterios para evaluar los niveles de THD de voltaje y corriente:

- $THD_V < 5 \%$ se considera normal y no existe peligro de mal funcionamiento de los equipos.
- $5 \% < THD_V < 8 \%$ supone una distorsión armónica considerable que debe tomarse en cuenta para evitar un mal funcionamiento de los equipos.
- $THD_V > 8 \%$ indica una distorsión armónica significativa, lo que aumenta la probabilidad de falla en los equipos, por lo que es necesario un estudio más exhaustivo y de equipos para la atenuación de esta medida.
- $THD_i < 10 \%$ se considera normal, por lo que la probabilidad de falla de los equipos es baja.
- $10 \% < THD_i < 50 \%$ indica una distorsión armónica considerable, por lo que puede incrementar la temperatura de los equipos disminuyendo la vida útil de estos, además de ser necesario un sobredimensionamiento de cables y fuentes.
- $THD_i > 50 \%$ indica una distorsión armónica significativa, por lo que es necesario un estudio más exhaustivo y de equipos para la atenuación de esta medida.

▪ Normativa

En Ecuador, los límites de distorsión total armónica de voltaje y corriente se indican en la Regulación No. ARCONEL 005/18 “Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica”; estos valores se rigen en la normativa IEEE estándar 519-2014.

En las tablas 6.2 y 6.3 se indican los límites de distorsión armónica individual, distorsión armónica total de voltaje, y los límites de distorsión armónica individual de corriente y distorsión de demanda total.

Tabla 6.2: Límites máximos de armónicos de voltaje (% del voltaje nominal) [162].

| Nivel de voltaje | Armónica individual (%) | THD (%) |
|------------------------|-------------------------|---------|
| Bajo voltaje | 5.0 | 8.0 |
| Medio voltaje | 3.0 | 5.0 |
| Alto voltaje (Grupo 1) | 1.5 | 2.5 |
| Alto voltaje (Grupo 2) | 1.0 | 1.5 |

Tabla 6.3: Niveles máximos de distorsión armónica de corriente [162].

| Nivel máximo de armónicos impares (% de la corriente máxima de demanda) | | | | | | |
|---|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------|
| I_{cc}/I_L | $3 \leq h \leq 11$ | $11 \leq h \leq 17$ | $17 \leq h \leq 23$ | $23 \leq h \leq 35$ | $35 \leq h \leq 50$ | TDD |
| <20 | 4.0 | 2.0 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5.0 |
| 20<50 | 7.0 | 3.5 | 2.5 | 1.0 | 0.5 | 8.0 |
| 50<100 | 10.0 | 4.5 | 4.0 | 1.5 | 0.7 | 12.0 |
| 100<1000 | 12.0 | 5.5 | 5.0 | 2.0 | 1.0 | 15.0 |
| >1000 | 15.0 | 7.0 | 6.0 | 2.5 | 1.4 | 20.0 |

Los límites para armónicos pares corresponden al 25 % de los límites indicados en la tabla

I_{cc} =corriente máxima de corto circuito en el punto común de acoplamiento (PCC).

I_L =corriente máxima de carga a frecuencia fundamental.

Para calcular la relación de corto circuito (SCR, por sus siglas en inglés), $SCR = I_{cc}/I_L$, es necesario obtener el valor de la corriente de corto circuito en el punto de acoplamiento; esta corriente se puede calcular mediante la ecuación (6.9) [169], o mediante la ecuación (6.10), la cual está en función de la resistencia del conductor y la distancia que recorre el cable desde el suministro de energía eléctrica hasta el tablero de distribución [170].

$$I_{cc,pu} = \frac{1}{X_T} \quad (6.9)$$

$$I_{cc} = \frac{V_{nominal}}{R_{conductor} \cdot Distancia} \quad (6.10)$$

Donde I_{cc} está expresada en [A], X_T impedancia del transformador en [p.u], $V_{nominal}$ en [V], $R_{conductor}$ está expresada en [Ω/m] y la *Distancia* está en [m].

La medición de las muestras se realiza en el PCC. Para sistemas en bajo y medio voltaje el PCC corresponde al punto del sistema de distribución más cercano al consumidor [162], como se observa en la figura 6.3.

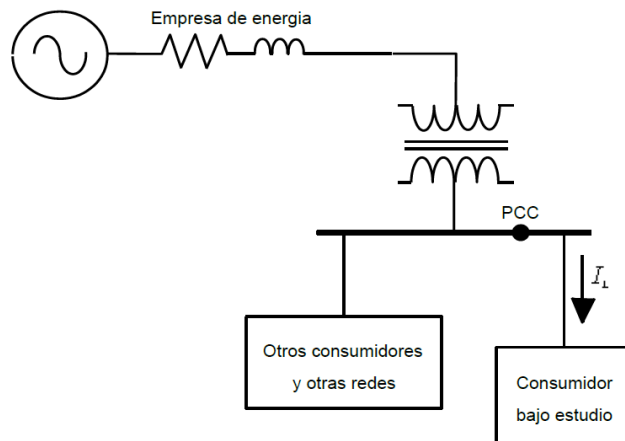


Figura 6.3: Punto común de acoplamiento en el lado de baja tensión del transformador [171].

En caso de que un consumidor se conecte al sistema de distribución mediante un transformador exclusivo para su conexión, el PCC se ubica en el lado de alta del transformador [162], como se observa en la figura 6.4.

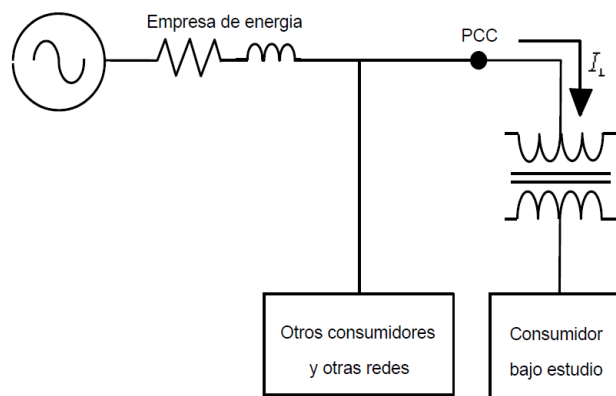


Figura 6.4: Punto común de acoplamiento en el lado de alta tensión del transformador [171].

6.5. Procedimiento para el estudio del comportamiento de una estación de carga rápida con salida en DC

El estudio del comportamiento de las estaciones de carga rápida comprende el análisis de las etapas de carga de la batería del VE, factor de potencia, distorsión armónica total de voltaje y distorsión de demanda total producido por la estación. Para ello, se realizó el experimento de adquisición de datos en el

Laboratorio de Microrred Eléctrica Campus – Balzay de la Universidad de Cuenca, empleando los siguientes equipos:

- Kia Soul EV con una batería de alto voltaje de 27 kWh (ver Tabla 4.1)
- Analizador de calidad de energía de tres fases PowerPad® III Modelo 8333, como se muestra en la figura 6.5. Este equipo permite medir valores eficaces, potencias y perturbaciones de las redes de distribución de energía, así como obtener una visualización gráfica instantánea de las características de la red trifásica.



Figura 6.5: PowerPad® III Modelo 8333 [172].

- Estación de carga rápida de la compañía PNE Power & Energy Solution de 50 kW, la cual cuenta con tres tipos de cargadores: CHAdeMO, CCS Combo 1 y conector AC tipo 2 de carga rápida, como se muestra en la figura 6.6. La ficha técnica de esta estación se muestra en el Anexo #20.



Figura 6.6: Estación de carga rápida de 50 kW de PNE Solution.

La estación de carga está conectada a la red de alimentación de distribución a través de un transformador trifásico de la marca INATRA de capacidad de 100 kVA 440V/254V-4x2.5%; 220V, como se muestra en la figura 6.7.



Figura 6.7: Transformador trifásico INATRA 100 kVA.

Para la adquisición de datos del experimento se emplea el diagrama que se indica en la figura 6.8, en donde el analizador de calidad de energía está conectado al lado de baja tensión del transformador (220 V), con conexión trifásica de 3 hilos 3 vatímetros con neutro virtual como se indica en la figura 6.9.

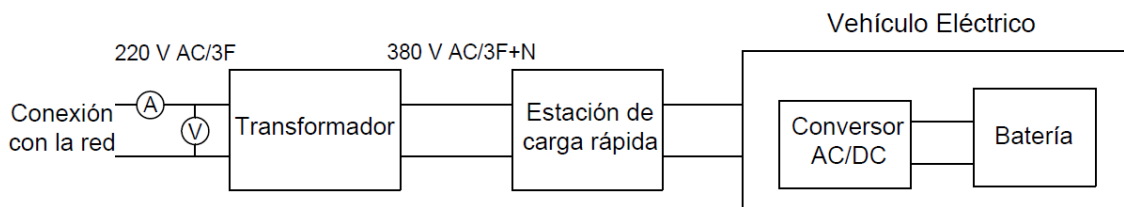


Figura 6.8: Esquema de medición.

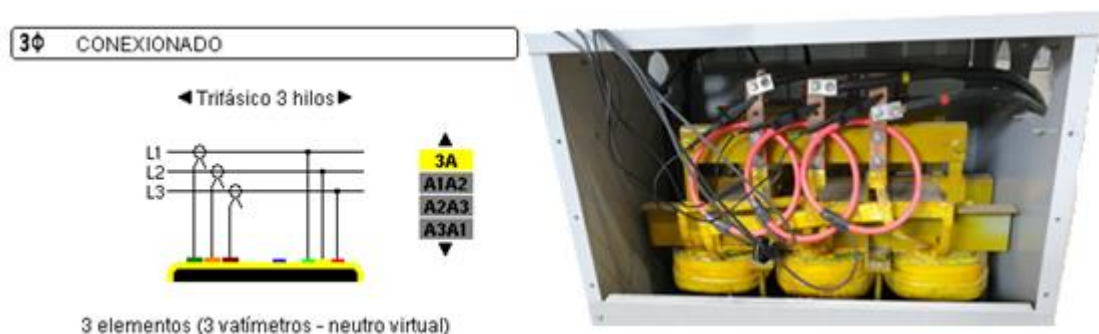


Figura 6.9: Conexión del analizador de energía al transformador.

El proceso de adquisición de datos tuvo una duración 34.3 minutos, empezando 48 segundos antes de conectar el cargador CHAdeMO a la estación de carga al VE (ver figura 6.10) y finalizando un 1.3 minutos después de que la estación se haya apagado automáticamente una vez que el VE haya alcanzado

el SoC final; esto con la finalidad de analizar el comportamiento de la red eléctrica cuando la estación de carga se encuentra encendida pero no está conectada al VE (modo de funcionamiento en standby).

El proceso de carga de la batería del vehículo tuvo una duración de 32.2 minutos en el caso de estudio, en donde el SoC inicial es de 14 % hasta alcanzar un SoC final de 83 %. Los datos obtenidos durante este experimento son: voltaje de línea rms, corriente rms por cada fase, potencias (P, Q, S), factor de potencia total, factor de potencia de desplazamiento, y distorsión total armónica de corriente y voltaje con respecto al valor de la fundamental (%f) y valor rms (%r). La adquisición de datos se realizó con una frecuencia de muestreo de 1 Hz, equivalente a un segundo, obteniendo un total de 2058 muestras.



Figura 6.10: Carga del VE.

Los gráficos realizados a partir de estos datos durante la carga de la batería del VE y el análisis de estos valores se muestran en las siguientes secciones.

6.6. Análisis del comportamiento del proceso de carga de la batería del VE mediante el uso de la estación de carga rápida

El proceso de carga de la batería de ion litio del VE se caracteriza por dos etapas:

- **Primera etapa, régimen de corriente constante:** en esta etapa la batería se empieza a cargar cuando la corriente es ligeramente nula e incrementa rápidamente hasta un valor de 130 A, mientras que la tensión experimenta

un fuerte aumento debido a la resistencia interna de la batería. Posteriormente, la tensión busca estabilizarse en 223 V a la vez que la corriente entra en el régimen constante de carga hasta llegar a la máxima intensidad (148.21 A), obteniendo la máxima potencia de 52.3286 kW en los primeros 18 minutos de carga, como se observa en la figura 6.11. Finalmente, la energía que se entrega al VE desde la red es 13.9410 kWh, que representa el 74.83 % de la energía total empleada para recargar la batería, es decir, durante esta etapa la estación de carga inyecta el mayor porcentaje energía de recarga al VE, razón por la cual el VE alcanza un SoC de 66 %, equivalente a 17.82 kWh de autonomía.

- **Segunda etapa, régimen de tensión constante:** durante esta etapa el voltaje incrementa hasta estabilizarse en un valor de 222.8 V, mientras que la corriente y la potencia descienden exponencialmente hasta llegar a cero a medida que se completa el proceso de carga del VE, momento en el cual se alcanza la tensión máxima de 223.9 V, como se observa en la figura 6.11. En los 14.2 minutos finales de esta etapa de carga, la energía que se entrega al VE desde la red representa el 25.17 % restante de la energía total de recarga, que equivale a 4.6869 kWh. Finalmente, la batería alcanza un SoC final de 83 %, equivalente a 22.41 kWh de autonomía.

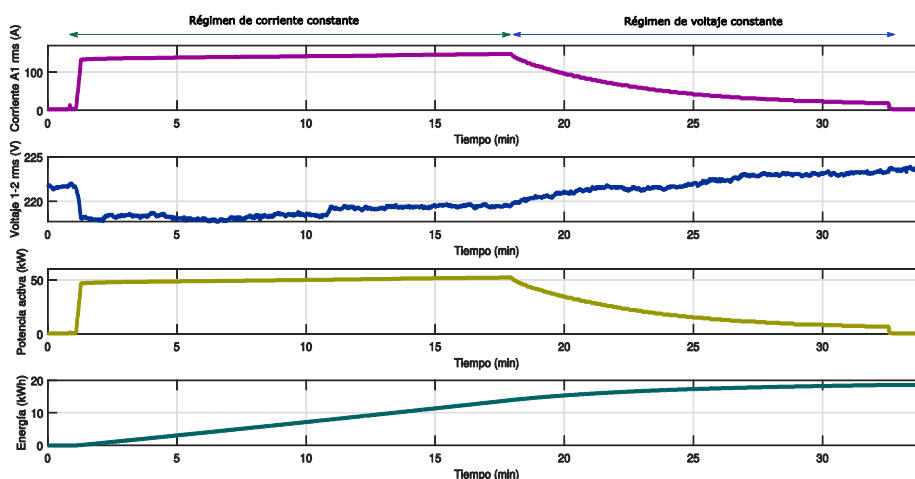


Figura 6.11: Comportamiento del proceso de carga de un VE mediante la estación de carga rápida (I, V, P, E).

- **Análisis del factor de potencia durante el proceso de carga de la batería del VE mediante el uso de la estación de carga rápida**

Durante los primeros 24 segundos de la etapa de régimen de corriente constante, el factor de potencia es bajo e incrementa rápidamente durante este tiempo hasta alcanzar un valor de 0.999, como se ilustra en la figura 6.12.

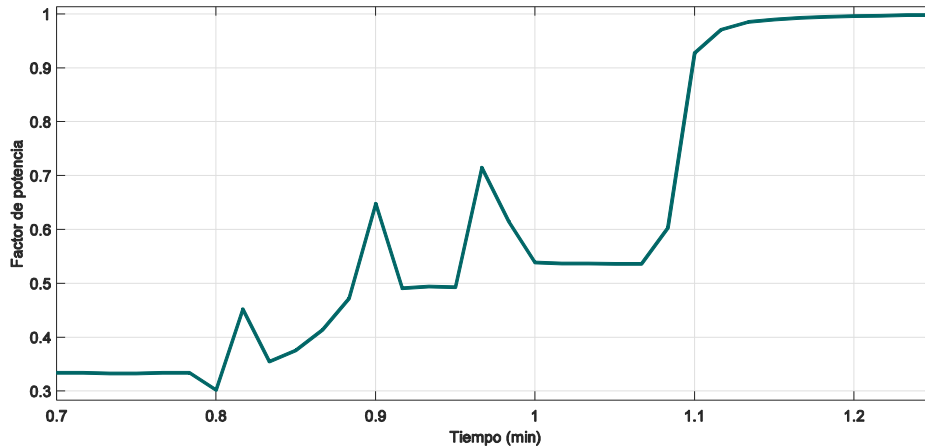


Figura 6.12: Factor de potencia durante los primeros 24 segundos de régimen de corriente constante.

Este valor de 0.999 se mantiene constante durante este régimen y durante los tres primeros minutos del régimen de voltaje constante; a partir de este punto el factor de potencia experimenta un mínimo decrecimiento a medida que finaliza el régimen de voltaje constante hasta llegar a un valor de 0.983, como se observa en la figura 6.13, momento en el cual el VE alcanza su SoC final, concluyendo el proceso de carga.

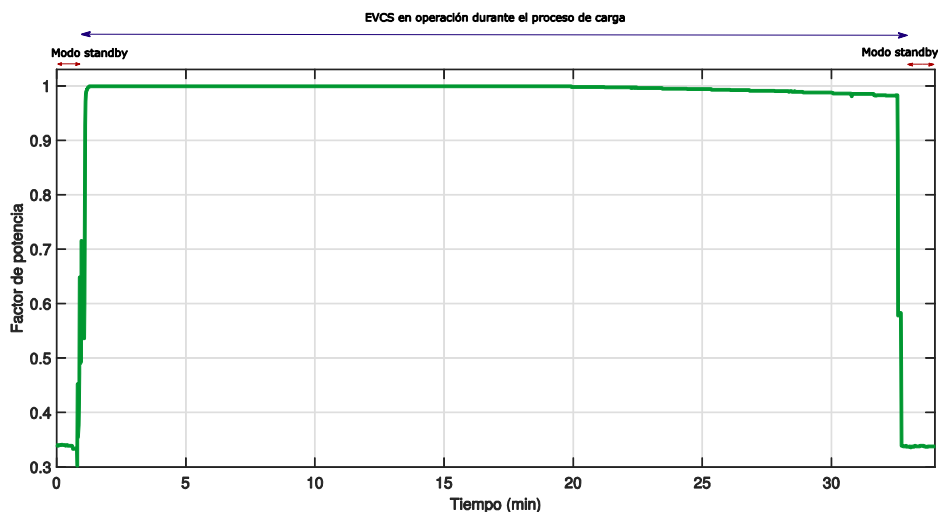


Figura 6.13: Factor de potencia durante el proceso de carga.

Como se observa en la figura 6.13, existen dos intervalos (48 segundos antes de iniciar la carga y 1.3 minutos después de finalizar la carga del VE) en los cuales el factor de potencia es igual a 0.34, esto se debe a que la estación de carga se encuentra operando en standby. Además, como se observa en la figura 6.14, durante este modo de funcionamiento existe un consumo de potencia activa cercano a los 0.450 kW , mientras el consumo de potencia reactiva es de aproximadamente 1.190 kVAR ; este requerimiento de potencia reactiva se debe a que el transformador necesita entre el 1 y 12 % de su potencia nominal para la magnetización de su núcleo, sumado a este requerimiento pero en menor medida se tienen los componentes capacitivos e inductivos del circuito de potencia de la estación de carga [173]. Debido a esto, el requerimiento de la potencia aparente es elevado, provocando un factor de potencia bajo de 0.34 en atraso.

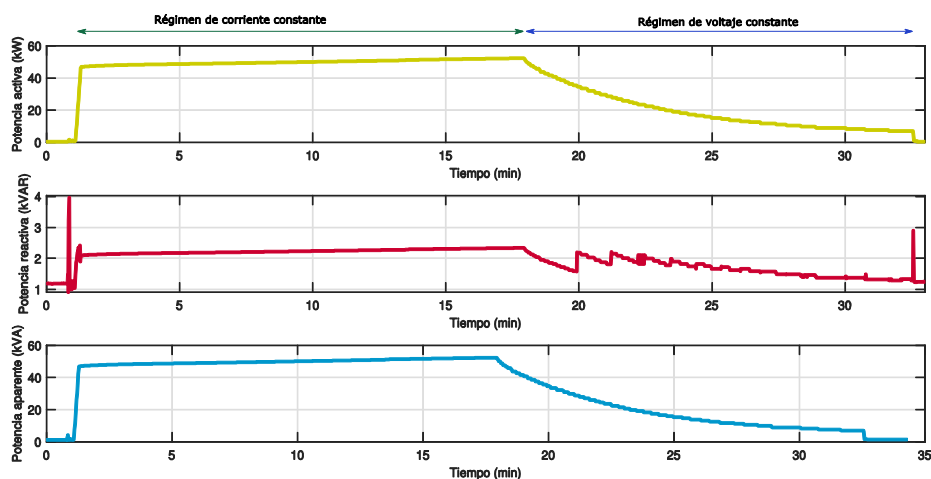


Figura 6.14: Comportamiento del perfil de potencias (P , Q , S).

En el Pliego tarifario para las empresas eléctricas de distribución - Periodo Enero – Diciembre 2020 [50], se considera un factor de potencia mínimo a cumplir de 0.92 para cargas comerciales, industriales, y prestación de servicios públicos y privados, por lo que los valores registrados durante el proceso de carga del VE se encuentran por encima de este límite; sin embargo, durante el funcionamiento de la estación de carga en modo standby, el factor de potencia es mucho menor al valor mencionado anteriormente, lo que generaría penalizaciones por un bajo factor de potencia en caso de que la estación de carga opere en este modo por periodos prolongados de tiempo. Debido a esto,

es necesario la instalación de sistemas que mejoren el factor de potencia, como por ejemplo un “banco de capacitores” que opere en los instantes en el que la estación de carga rápida se encuentra funcionando en modo standby.

El dimensionamiento del banco de capacitores para la corrección del factor de potencia de la estación funcionando en modo standby se realiza a continuación:

$$C = \frac{P \cdot (\tan \varphi_{inicial} - \tan \varphi_{final})}{V_{rms}^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \quad (6.11)$$

Donde $P = 430.391 [W]$, $\cos(\varphi_{inicial}) = 0.34$ por lo que $\varphi_{inicial} = 70.123^\circ$, y $\cos(\varphi_{final}) = 0.99$ por lo que $\varphi_{final} = 8.109^\circ$, $V_{rms} = 220 [V]$ y $f = 60 [Hz]$.

Reemplazando los datos, se obtiene:

$$C = \frac{430.391 \cdot (\tan(70.123) - \tan(8.109))}{220^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60} = 61.8814 [\mu F] \quad (6.12)$$

En el Laboratorio de Microrred Eléctrica Campus – Balzay se cuenta con un capacitor de la marca ARCOTRONICS de $75 \mu F$ (ver figura 6.15), con el cual el factor de potencia alcanza un valor mayor a 0.95.



Figura 6.15: Condensador Arcotronics de $75 \mu F$.

6.7. Análisis de armónicos durante el proceso de carga de la batería del VE mediante el uso de la estación de carga rápida

El analizador de calidad de energía proporciona información de la distorsión armónica individual tanto para voltaje como para corriente desde el armónico fundamental hasta el armónico de orden 50.

▪ Armónicos de voltaje

Como se muestra en la figura 6.16, durante el inicio de la primera etapa del régimen de corriente constante, en donde la corriente es ligeramente nula e incrementa rápidamente, mientras la tensión experimenta un fuerte aumento, la distorsión armónica total de voltaje presenta picos de distorsión en las tres fases, cuyos valores son $THD_{V1-2} = 0.8 \%f$, $THD_{V2-1} = 0.5 \%f$, $THD_{V3-1} = 0.6 \%f$; estos valores se encuentran por debajo del $8 \%f$, el cual es el límite de distorsión armónica total para bajo voltaje (ver Tabla 6.2). Cuando la corriente es constante, la distorsión armónica total de voltaje presenta un incremento durante aproximadamente 4 minutos, estos valores son $THD_{V1-2} = 1 \%f$, $THD_{V2-1} = 0.8 \%f$, $THD_{V3-1} = 0.9 \%f$, los cuales también se encuentran dentro del límite de distorsión armónica total de voltaje, y durante el tiempo restante que dura este régimen la distorsión armónica total de voltaje se reduce presentando pequeñas variaciones.

Posteriormente, en el régimen de voltaje constante, que es en donde la corriente disminuye progresivamente con la carga de la batería del VE, la distorsión armónica total de voltaje vuelve a presentar valores pico cercanos al 1 % durante aproximadamente 4 minutos, para finalmente disminuir progresivamente mostrando pequeñas variaciones hasta que finaliza el proceso de carga.

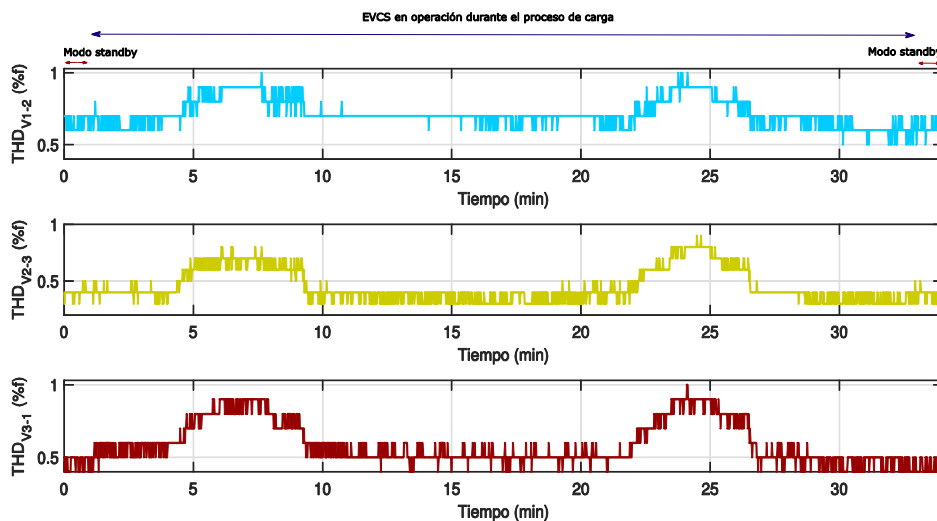


Figura 6.16: THDV para voltajes de línea.

Durante todo el proceso de carga se observó que el 5^{to} armónico es el más representativo en cada uno de los voltajes de línea ($THD_{V_{1-2}} = 0.6 \%f$, $THD_{V_{2-1}} = 0.6 \%f$, $THD_{V_{3-1}} = 0.8 \%f$), como se muestra en la figura 6.17; estos valores se encuentran por debajo del 5 %f, el cual es el límite de distorsión armónica individual para bajo voltaje (ver Tabla 6.2).

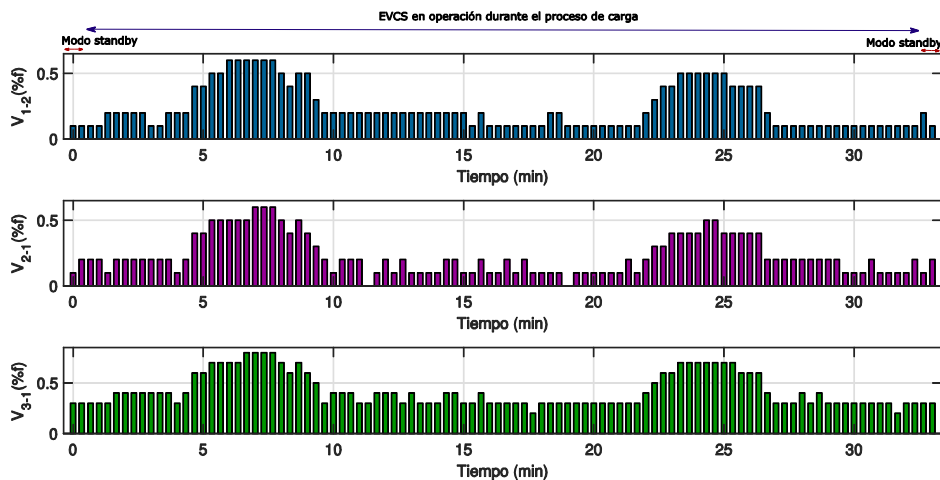


Figura 6.17: Distorsión armónica individual del 5to armónico para voltajes de línea.

Durante el funcionamiento de la estación de carga en modo standby, la distorsión total armónica de voltaje presenta valores inferiores al 1 % en los tres voltajes de línea (ver figura 6.16), los cuales se encuentran por debajo del límite de distorsión armónica total para bajo voltaje. De igual manera, la distorsión armónica individual está por debajo del valor establecido en la Tabla 6.2, de manera que no existe ninguna perturbación a la forma de onda de tensión, como se muestra en la figura 6.18.

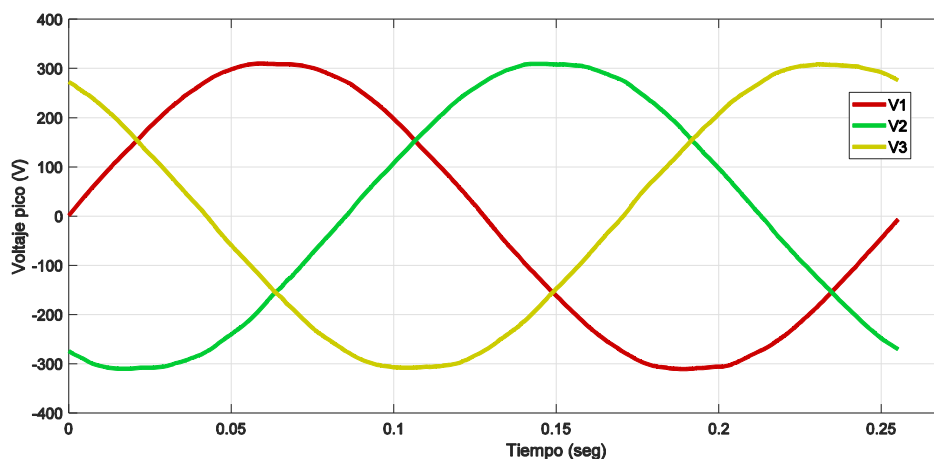


Figura 6.18: Forma de onda de voltaje – estación de carga en modo standby.

▪ Armónicos de corriente

En la figura 6.19 se puede observar que, durante el régimen de corriente constante, la distorsión armónica total de corriente se mantiene constante en las tres fases con valores de $THD_{I1} = 2.35 \%f$, $THD_{I2} = 2.17 \%f$, $THD_{I3} = 1.48 \%f$. Posteriormente, en el régimen de voltaje constante, la distorsión armónica total de corriente aumenta hasta alcanzar valores de $THD_{I1} = 9.7 \%f$, $THD_{I2} = 13.3 \%f$, $THD_{I3} = 8.3 \%f$, debido a que en este régimen la corriente disminuye exponencialmente ya que el VE se encuentra cada vez más cerca de su nivel máximo de carga permitido por lo que la inyección de corriente disminuye. Este comportamiento típico de los sistemas de conversión de energía permite que la distorsión de corriente manejada aumente a medida que la potencia de operación sea cada vez menor a la nominal, acercándose al modo de funcionamiento en standby, razón por la cual se presenta un aumento en la distorsión armónica. Además, tanto al inicio como al final del proceso de carga, se presentan valores de distorsión armónica elevados de carácter transitorio, debido a que es en este instante de tiempo en donde la corriente cambia de un valor cercano a cero a un valor de corriente nominal o viceversa, provocando una distorsión armónica total de corriente de valor significativo, pero despreciable por su duración.

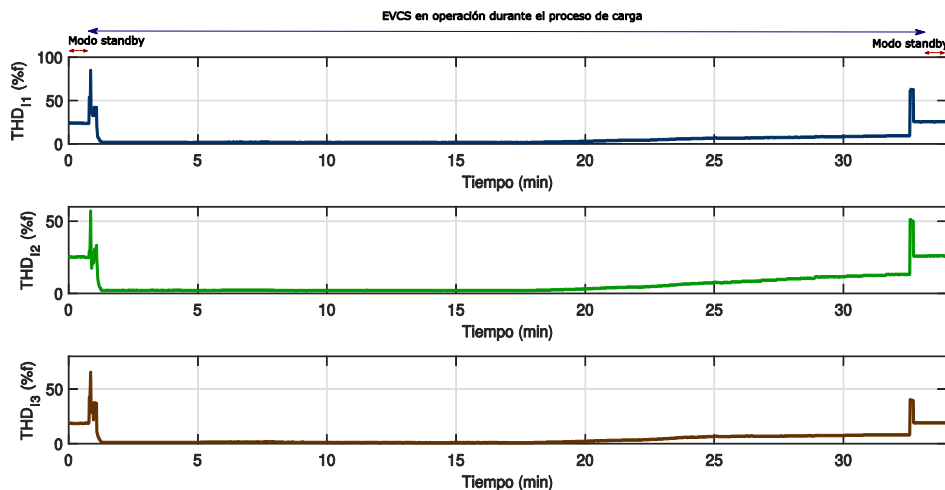


Figura 6.19: THDi para corrientes de fase.

Durante el funcionamiento de la estación de carga en modo standby, la distorsión armónica total de corriente presenta valores de $THD_{I1} = 24 \%f$,

$THD_{I_2} = 25.3\%f$, $THD_{I_3} = 19\%f$, los cuales afectan a la forma de onda de corriente como se muestra en la figura 6.20.

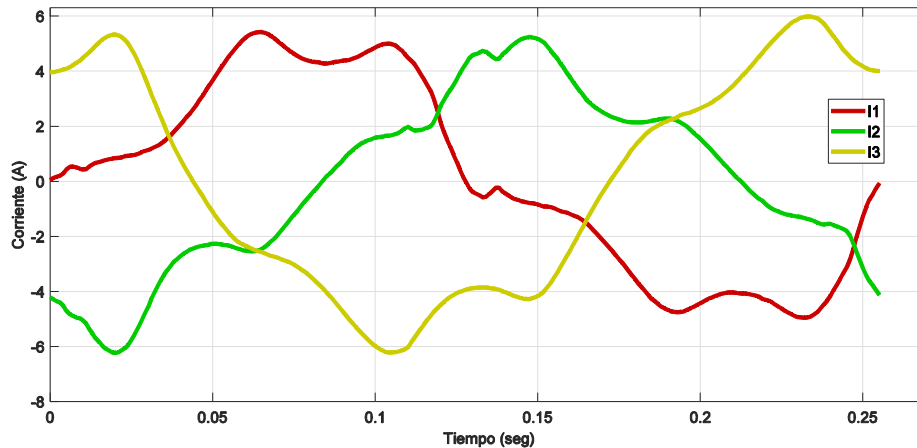


Figura 6.20: Forma de onda de corriente - estación de carga en modo standby.

Sin embargo, es importante analizar el TDD de acuerdo a la normativa empleada, ya que este parámetro permite evaluar el impacto de la distorsión armónica en el sistema cuando se tiene una demanda baja o alta de carga.

Para determinar los límites de distorsión armónica individual y distorsión de demanda total es necesario calcular la corriente de corto circuito en el punto de medición. Para ello, se utiliza la ecuación (6.10), en donde el tipo de conductor es de cobre flexible con aislamiento de polietileno de cadena cruzada (XLPE) con sección nominal de 95 mm^2 , y la distancia que recorre el conductor desde el suministro de energía es de 30 metros, por lo que:

$$I_{cc} = \frac{127}{0.000206 \cdot 30} = 20550.16 \text{ [A]} \quad (6.13)$$

De acuerdo a las mediciones efectuadas la corriente máxima de carga es de $I_L = 148.21 \text{ A}$ correspondiente a la fase 1, por lo que se obtiene la relación de corto circuito $SCR = 138.65$, valor que se encuentra en el intervalo $100 < SCR < 1000$ presentado en la Tabla 6.3, donde se definen los límites de distorsión de demanda total, así como los límites de corriente armónica individual.

Utilizando la ecuación (6.4) se calcula la distorsión de demanda instantánea, para posteriormente calcular su valor total, como se muestra en la figura 6.21.

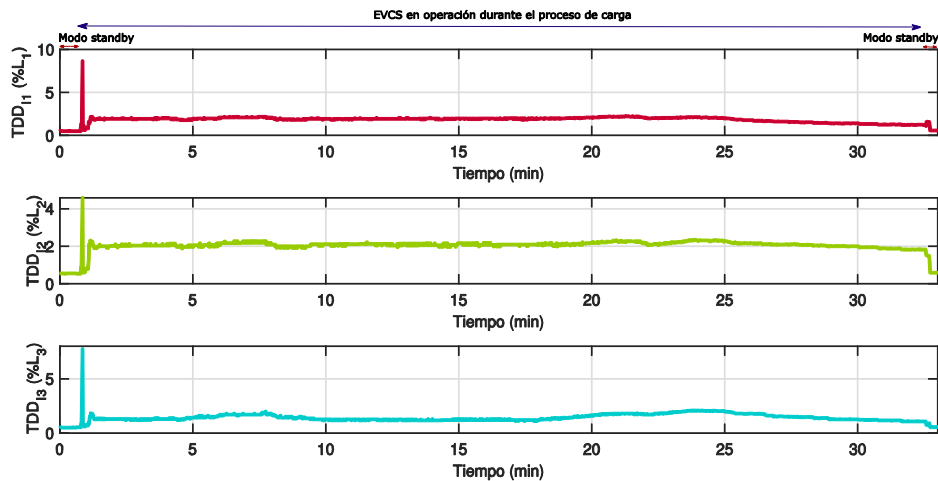


Figura 6.21: TDD para corrientes de fase.

En la figura 6.21 se observa que el TDD para la estación de carga en estudio disminuye para valores bajos de corriente (modo standby), en las tres fases se presentan valores de $TDD \leq 0.55\%$, los cuales se encuentran por debajo del límite de 15% presentado en la Tabla 6.3, mientras que como se observa en la figura 6.19, el THD_i aumenta sustancialmente en estos intervalos (modo standby); esto se debe a que la corriente fundamental siempre será menor a la corriente máxima de carga por lo que el TDD será menor al THD_i , a excepción del intervalo de tiempo en el cual se trabaja a plena carga, en donde el TDD será igual al THD_i .

En la figura 6.22, en donde se muestra el THD_i y TDD de la fase 1, se observa que durante el proceso de carga en el régimen de corriente constante, que es el intervalo en donde se presenta la potencia nominal máxima, tanto el THD_i como el TDD son similares ($THD_i \approx TDD \approx 2.2\%$) debido a que en este intervalo de tiempo es en donde la corriente fundamental es igual al valor de la corriente máxima de carga; mientras que en el régimen de voltaje constante, el TDD disminuye debido a que es el intervalo de tiempo en el cual la potencia y corriente disminuyen exponencialmente hasta finalizar el proceso de carga. Este análisis es válido para las fases 2 y 3. Por lo tanto, estos valores de TDD se encuentran por debajo del límite de distorsión de demanda total (15%), que se presentan en la Regulación No. ARCONEL 005/18.

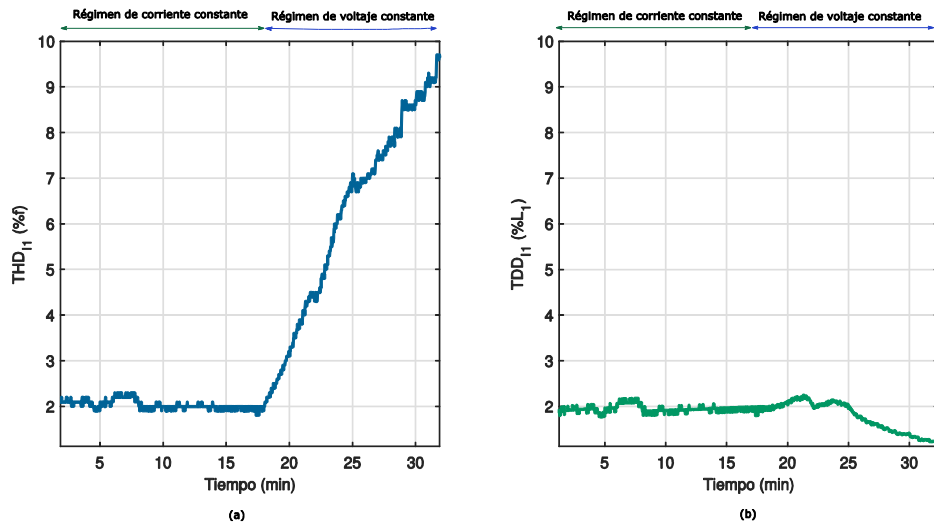


Figura 6.22: (a) THDi fase 1 y (b) TDD de la fase 1.

Dado que la Regulación No. ARCONEL 005/18 también establece los límites de distorsión armónica individual de corriente según el orden armónico, se analizan estos valores de los datos adquiridos por el equipo de medición en donde se determina que durante las etapas de carga el 3^{er} y 5^{to} armónico son los más representativos en cada una de las corrientes de fase (ver figura 6.23 y 6.24), cuyos valores se encuentran por debajo del límite de los niveles máximos de distorsión armónica individual de corriente, presentados en la Tabla 6.3. El cumplimiento de los límites de distorsión armónica para armónicos de orden par e impar se muestra en la tabla 6.4.

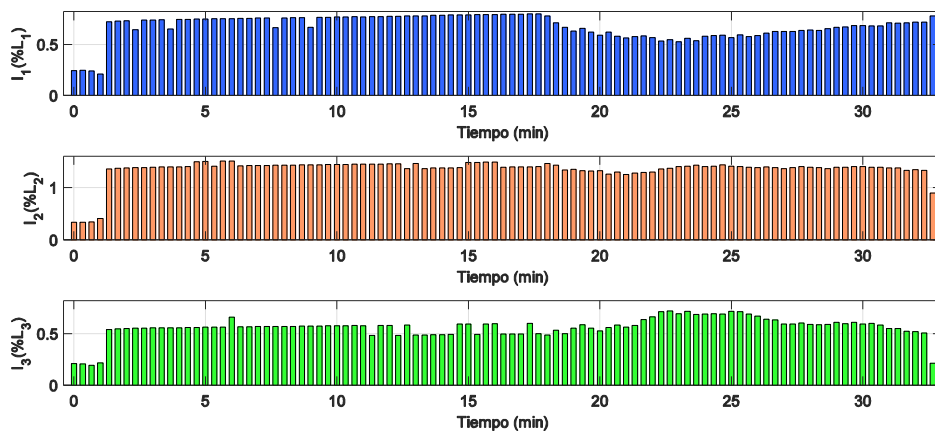


Figura 6.23: Distorsión armónica individual del 3er armónico para corrientes de fase.

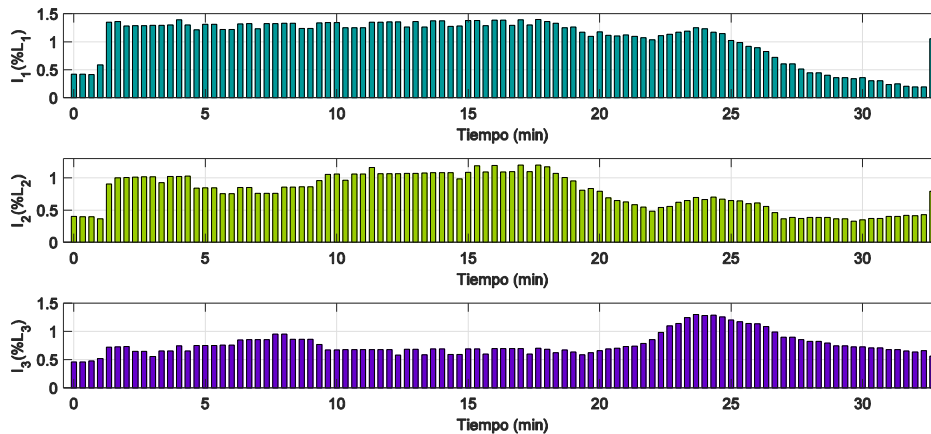


Figura 6.24: Distorsión armónica individual del 5to armónico para corrientes de fase.

Tabla 6.4: Cumplimiento del límite de armónicos.

| Nivel máximo de armónicos pares e impares (% de la corriente máxima de demanda) | | | | | |
|---|-----------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|
| I_{cc}/I_L | $3 \leq h < 11$ | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $35 \leq h < 50$ |
| 100 < 1000 | 12.0 | 5.5 | 5.0 | 2.0 | 1.0 |
| | Cumple | Cumple | Cumple | Cumple | Cumple |
| | $2 \leq h < 10$ | $10 \leq h < 16$ | $16 \leq h < 22$ | $22 \leq h < 34$ | $34 \leq h \leq 50$ |
| | 3 | 1.375 | 1.25 | 0.5 | 0.25 |
| | Cumple | Cumple | Cumple | Cumple | Cumple |

6.8. Conclusiones

En este capítulo se realizó el estudio del comportamiento de las EVCS, el cual comprende el análisis de la calidad de energía derivada del proceso de carga de la batería del VE con respecto al factor de potencia, distorsión armónica de voltaje y corriente, y distorsión de demanda total. Este análisis se efectúa con el fin de realizar recomendaciones sobre las estaciones de carga y el impacto de la futura implementación de este tipo de estaciones en el sistema de distribución eléctrica.

El análisis se realizó en base a la experimentación sobre el funcionamiento de la estación de carga en modo standby y durante el proceso de carga de la batería, la cual en condiciones iniciales presentaba un SoC de 14 %.

Durante el proceso de carga se presentan dos regímenes, los cuales son: corriente constante y voltaje constante. Durante el régimen de corriente constante se inyecta corriente a la batería, la cual aumenta rápidamente desde 0 A hasta alcanzar una corriente máxima de 148.21 A. Este régimen tiene una



duración de 18 minutos y es en donde se presenta la carga principal de la batería debido a que en este intervalo de tiempo se alcanza la potencia máxima de carga de 52.32 kW, obteniendo SoC de 66 %, equivalente a 17.82 kWh de autonomía del VE al finalizar este régimen. A partir de este punto inicia el régimen de voltaje constante, en donde la estación intenta mantener el voltaje constante a medida que la corriente decrece exponencialmente conforme la batería absorbe la carga restante para alcanzar un SoC final de 83 % equivalente a 22.41 kWh de autonomía. Por otra parte, el modo funcionamiento en standby se refiere a cuando la EVCS se encuentra encendida pero no está conectada al VE, funcionando como una fuente de tensión AC/DC, por lo que se puede considerar que el transformador de potencia está trabajando en vacío.

Del estudio de la estación de carga rápida de 50 kW se verifica que el factor de potencia real de la estación durante la mayor parte proceso de carga se encuentra en un valor constante de 0.99, lo cual concuerda con el valor de mayor o igual a 0.95 presentado en la ficha técnica de la estación; además este valor cumple la normativa de las empresas eléctricas de distribución del Ecuador las cuales establecen un valor mínimo a cumplir de 0.92, por lo que esta estación no afecta el funcionamiento de la red de suministro eléctrico cuando se encuentra cargando al VE. Sin embargo, se observó que cuando la estación se encuentra funcionando en modo standby el factor de potencia decrece drásticamente hasta un valor de 0.34, debido a que el transformador opera en vacío, razón por la cual la potencia activa que realiza trabajo útil es baja, mientras que la potencia reactiva que absorbe desde la red eléctrica para la magnetización de su núcleo es del 1 – 12 % de la potencia nominal, por lo que su requerimiento de potencia aparente crece en la misma proporción, afectando de esta forma el factor de potencia real de la instalación. Debido a este bajo factor de potencia, el cliente podría ser penalizado por la empresa eléctrica si es que este modo de funcionamiento se presentara por periodos prolongados de tiempo, por lo que se recomienda la instalación de un banco de condensadores de conexión y desconexión automática con una capacidad de 61.88 μF conectado al transformador para elevar el factor de potencia de la instalación únicamente cuando la estación de carga esté operando bajo este modo.



Durante el proceso de carga de la batería y funcionamiento de la EVCS en modo standby, los niveles de distorsión armónica total de voltaje que se presentan son inferiores al 1 %, siendo el 5^{to} armónico el más representativo. Estos valores se encuentran por debajo de los límites presentados en la Regulación No. ARCONEL 005/18, de forma que estos valores no son representativos al no producir ninguna perturbación en la forma de onda de voltaje.

Para el estudio de armónicos de corriente se empleó el análisis de la distorsión armónica total de corriente y distorsión de demanda total, en donde se observó que para el funcionamiento de la estación en modo standby se presentan los porcentajes más altos de THD_i , cercanos al 26 %, los cuales afectan a la forma de onda de corriente; sin embargo en este intervalo de tiempo, el TDD presenta valores más bajos menores al 0.55 %, los cuales están por debajo del límite de 15 % establecido en la regulación nacional. Por lo tanto, se puede expresar que el THD_i en condiciones de baja carga presenta valores altos pero que no afectan en la operación de los equipos, debido a que la energía distorsionante que fluye es baja. Por otra parte, durante el proceso de carga del vehículo, en el régimen de corriente constante se observa que el valor del THD_i y TDD son similares ($THD_i \approx TDD \approx 2.2 \%$), debido a que en este intervalo de tiempo es donde la estación trabaja a plena carga, siendo el valor de la corriente fundamental igual a la corriente máxima de carga; y en el régimen de voltaje constante, el TDD disminuye mientras el THD_i aumenta a medida que la corriente disminuye exponencialmente al estar la batería culminando su proceso de carga.

Finalmente, se puede mencionar que el factor de potencia, niveles de distorsión armónica total de voltaje y distorsión de demanda total producidos por la estación de carga rápida PNE de 50 kW cumplen con los límites establecidos por la Regulación No. ARCONEL 005/18, por lo que es recomendable la implementación de estaciones de carga rápida ya que no generan ningún impacto significativo en la red de suministro eléctrico, previo al estudio de calidad de energía.



Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones

7.1. Conclusiones

- La información recopilada y analizada en cada uno de los capítulos del presente trabajo permitió identificar a los vehículos eléctricos como una alternativa energéticamente más eficiente frente al uso de vehículos de combustión interna, así como una oportunidad para generar nuevas industrias, negocios y fuentes de empleo; sin embargo, esta tecnología vehicular presenta algunas restricciones que han impedido su adopción, siendo las principales causas:
 - El elevado costo de los vehículos eléctricos de gama media.
 - Autonomía de estos vehículos.
 - La correcta ubicación y despliegue de infraestructura de carga pública y privada, no solo en áreas urbanas sino también en carreteras. Para el caso de las carreteras, la carga rápida es el tipo de carga más adecuado, para garantizar al usuario una experiencia lo más cercana a la de “repostar” un vehículo convencional, además de reducir la “ansiedad de autonomía”.
- Se estudió e implementó un modelo matemático “cuasi-estacionario” que permite estimar el consumo energético de un modelo de vehículo, mediante el comportamiento dinámico que el vehículo describe al desplazarse por la carretera a partir de los datos obtenidos del perfil de velocidad y de los datos de geolocalización. El modelo fue desarrollado mediante un método analítico descrito por las leyes de la Física mecánica y ecuaciones algebraicas que describen el comportamiento de diversos factores que intervienen en el análisis de fuerzas aplicadas sobre el vehículo. Este modelo fue validado a partir de cinco ensayos en las principales rutas de salida de la ciudad de Cuenca empleando el vehículo eléctrico Kia Soul modelo 2016 de 27 kWh, mediante diferentes condiciones de altura, velocidad, flujo vehicular, masa y de clima, lo cual sirvió para validar exitosamente el modelo propuesto,



obteniendo un error relativo promedio de 6.10 % para la energía de descarga de la batería del VE, 9.12 % para la energía de carga y 9.24 % para la energía neta consumida durante los recorridos; valores considerados como una correcta estimación del consumo energético del VE en carretera, dadas las características del modelo propuesto y de la aleatoriedad de cada una de condiciones bajo las cuales se desarrollaron las pruebas.

- La metodología propuesta en este estudio permitió identificar once escenarios en la ruta Cuenca – Guayaquil vía E582 para la ubicación de EVCS, de los cuales tres obtuvieron el mayor porcentaje de ponderación: el escenario 10 (red de infraestructura robusta), conformado por las EVCS Virgen del Cajas, Vista Linda, Tamarindo y Cerritos, el cual obtuvo un porcentaje de viabilidad del 83.5 %; el escenario 8 (red de infraestructura media), con las EVCS Virgen del Cajas, Vista Linda y Puerto Inca, con un porcentaje de viabilidad del 81.66 %; y el escenario 2 (red de infraestructura mínima) con un porcentaje de viabilidad del 81.25 %, conformado por las EVCS Vista Linda y Puerto Inca. Los escenarios 8 y 10 son escenarios muy conservadores que garantizan a los usuarios de VE de gama media que recorren esta vía poder realizar sus procesos de recarga sin temor a quedarse sin autonomía, tanto en la ruta de ida como de regreso, satisfaciendo la necesidad de una infraestructura de recarga a corto plazo; sin embargo, a largo plazo estos escenarios se podrían ver sobredimensionados debido a que la capacidad de las baterías de los VE aumenta con el avance de la ciencia de los materiales, razón por la cual el escenario 2 sería el más apropiado bajo estas circunstancias, teniendo en cuenta que el modelo matemático fue implementado con base en las especificaciones técnicas del Kia Soul EV 2016, con capacidad de 27 kWh, el cual es uno de los modelos de vehículos más vendidos en el mercado nacional.
- Para el estudio del comportamiento de las estaciones de carga rápida con salida en DC se empleó la EVCS PNE Solution de 50 kW, en donde se observó que existen dos regímenes durante el proceso de carga de la batería



de alto voltaje del Kia Soul EV, los cuales son: régimen de corriente constante y régimen de voltaje constante. En el régimen de corriente constante se presenta la máxima potencia de carga, por lo que es la etapa en donde se recarga en mayor medida la batería del VE, y en el régimen de voltaje constante, la corriente y potencia disminuyen exponencialmente a medida que se completa el proceso de carga. Además, se comprobó que estos modelos de estaciones no generan un impacto significativo en la red eléctrica de distribución, ya que los valores de factor de potencia, niveles de distorsión armónica de voltaje y distorsión total de demanda producidos por la estación de carga analizada cumplen con los límites establecidos por la Regulación No. ARCONEL 005/18.

7.2. Recomendaciones

- Validar el modelo matemático empleando otros modelos de VE en varias rutas de largas distancias, con diferentes condiciones topográficas y que impliquen una mayor logística para realizar procesos de recarga durante el recorrido.
- Adquirir datos exactos de los parámetros de cada fabricante de vehículos eléctricos para obtener un modelo matemático con una mejor estimación de consumo energético.
- Comprobar el correcto funcionamiento de los equipos de medición, así como de los datos que se obtienen durante y al final de las pruebas realizadas con el vehículo eléctrico en carretera.

7.3. Trabajos futuros

- Aplicar la metodología propuesta para la ubicación de estaciones de carga en otras vías interprovinciales e intercantonales del país, como herramienta rápida y efectiva para crear un mapa preliminar de estaciones de carga rápida a nivel nacional, que permita a los diferentes stakeholders promover este tipo de tecnología vehicular.



- Desarrollar un modelo matemático de estado dinámico para obtener mejores estimaciones del consumo energético de un VE, y optimizar los procesos de selección de las ubicaciones de la infraestructura de carga en la metodología propuesta.

Bibliografía

- [1] J. M. Miranda Hernández y N. Iglesias González, «Las infraestructuras de recarga y el despliegue del vehículo eléctrico». 2015, [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/132455977.pdf>.
- [2] L. Isla, M. Singla, M. Rodríguez Porcel, y I. Granada, «Análisis de tecnología, industria, y mercado para vehículos eléctricos en América Latina y El Caribe». mar. 2019, [En línea]. Disponible en: https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/An%C3%A1lisis_de_tecnolog%C3%ADa_industria_y_mercado_para_veh%C3%ADculos_el%C3%A9ctricos_en_Am%C3%A9rica_Latina_y_el_Caribe_es_es.pdf.
- [3] Energy Technology Policy (ETP) Division of the Directorate of Sustainability, Technology and Outlooks (STO) of the International Energy Agency (IEA), y Mechthild Wördsörfer, «Global EV Outlook 2019: Scaling-up the transition to electric mobility». 2019.
- [4] Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, «Sector Automotor en cifras Julio 2020 - No. 46». jul. 22, 2020, [En línea]. Disponible en: <https://www.aeade.net/wp-content/uploads/2020/07/Boletin-Sector-en-cifras-46-resumen-en-espanol.pdf>.
- [5] «Electromaps», *Electromaps*. <https://www.electromaps.com/mapa/p/62703>.
- [6] Sociedad de Técnicos de Automoción, *El Vehículo Eléctrico. Desafíos tecnológicos, infraestructuras y oportunidades de negocio*. Libbooks, 2011.
- [7] «Faraday Motor», *Magnet Academy*. <https://nationalmaglab.org/education/magnet-academy/watch-play/interactive/faraday-motor?fbclid=IwAR3Bjn18R73BEXW6tsSg28shcspBSkiuiERWiCK6nXUh6LTO6YrgtJurrUE>.
- [8] Budapest University of Technology and Economics, «Jedlik, Ányos István». https://dokutar.omikk.bme.hu/archivum/angol/htm/jedlik_a.htm.
- [9] Ariella Brown, «The Interesting History of Electric Cars», may 19, 2019. <https://interestingengineering.com/the-interesting-history-of-electric-cars>.
- [10] S. Schoppert, «Thomas Parker Invented the First Electric Car in 1884», *HistoryCollection.co*, feb. 24, 2017. <https://historycollection.co/thomas-parker-invented-first-electric-car-1884/>.
- [11] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, y K. Ebrahimi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*. CRC Press, 2018.
- [12] «Egger-Lohner C.2 Phaeton, así era el primer Porsche eléctrico de 1898», *abc*, jul. 11, 2019. https://www.abc.es/motor/novedades/abci-egger-lohner-phaeton-primer-porsche-electrico-1898-201907110230_noticia.html.
- [13] «Prologue - Preparing the way for the Columbia cars, and the formation of the Electric Vehicle Company». <http://www.kcstudio.com/electrobat.html>.
- [14] «Lohner Egger Modell C2 Phaeton Elektromobil, 1898». <https://auta5p.eu/lang/en/katalog/auto.php?idf=Lohner-Egger-Modell-C2-Phaeton-Elektromobil-23673>.
- [15] Hulton Archive, «La Jamais Contente», *Getty Images*. <https://www.gettyimages.com.mx/detail/fotografía-de-noticias/laurels-for-camille-jenatzy-the-first-man-to-fotografía-de-noticias/2673500?adppopup=true>.



- [16] Bettmann, «Ford model T», *Getty Images*. <https://www.gettyimages.com.mx/detail/fotografía-de-noticias/three-quarter-view-of-a-1908-model-t-ford-fotografía-de-noticias/515210446?adppopup=true>.
- [17] P. Valdes-Dapena y I. Sherman, «Electric cars have been around since before the US Civil War», *CNN Business*, 2019. <https://www.cnn.com/interactive/2019/07/business/electric-car-timeline/index.html>.
- [18] «General Motors EV1», *Wikipedia*. dic. 03, 2019, [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=General_Motors_EV1&oldid=929128247.
- [19] D. Murias, «La autonomía del Tesla Model 3 ya es oficial, y no hay sorpresas: ¡hasta 500 kilómetros!», *Motorpasion*, nov. 30, 2017. <https://www.motorpasion.com/tesla/la-autonomia-del-tesla-model-3-ya-es-oficial-y-no-hay-sorpresas-hasta-500-kilometros> (accedido abr. 23, 2020).
- [20] G. Eastman House, «Lunar Roving», *Getty Images*. <https://www.gettyimages.com.mx/detail/fotografía-de-noticias/the-lunar-roving-vehicle-on-the-surface-of-the-fotografía-de-noticias/88970995?adppopup=true>.
- [21] J. B. Carnett, «1997 Saturn EV1 Electric Car», *Getty Images*, 1997. <https://www.gettyimages.com.mx/detail/fotografía-de-noticias/silver-saturn-ev-1-electric-car-on-at-a-fotografía-de-noticias/130300806?adppopup=true>.
- [22] M. DeBord, «I spent several hours testing Tesla's all-electric Model 3 — here's what it's like to drive», *Business Insider*. <https://www.businessinsider.com/tesla-model-3-first-drive-impressions-pictures-2018-2>.
- [23] S. Jain y L. Kumar, «31 - Fundamentals of Power Electronics Controlled Electric Propulsion», en *Power Electronics Handbook (Fourth Edition)*, M. H. Rashid, Ed. Butterworth-Heinemann, 2018, pp. 1023-1065.
- [24] U.S. Government, «All-Electric Vehicles», *Fuel Economy*. <http://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml>.
- [25] Kia, «¿Qué distancia puedo recorrer en un coche eléctrico con una sola carga?» <https://www.kia.com/es/todo-sobre-kia/experiencias-kia/tecnologia/electrificacion/autonomia-coches-electricos/>.
- [26] SAE International, «SAE J1772, SAE Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler». 2010, [En línea]. Disponible en: http://www.fastgm.com/travis/J1772_Revised_Jan2010.pdf.
- [27] U.S. Department of Energy, «Plug-In Electric Vehicle Handbook for Public Charging Station Hosts». 2012, [En línea]. Disponible en: <https://afdc.energy.gov/files/pdfs/51227.pdf>.
- [28] V. Schwarzer y R. Ghorbani, «Current State-of the-Art of EV Chargers», 2015.
- [29] «Clipper Creek LCS-25 Level 2 Charge Station - NEMA 14-30 Plug EVSE», *EV West*. https://www.evwest.com/catalog/product_info.php?products_id=206.
- [30] «Wallpod - J1772 Tethered», *JET Charge One*. <https://store.jetcharge.com.au/products/wallpod-j1772-tethered>.



- [31] SAE International, «SAE International standards work, including communication protocols and connectors, fast charge, batteries». 2011.
- [32] Enel X, «JuicePump 50 kW DC Rapid Charging Station». <https://evcharging.enelx.com/uk/commercial/juicepump-50?fbclid=IwAR0o9yI9BveAxv0ZEYI0tbxKeoalsUF4n0xAAMkcl3V1pFVe9ON3RBS6GMw>.
- [33] «Conectores para la recarga del vehículo eléctrico», *Electromovilidad*. <http://electromovilidad.net/conectores-para-la-recarga-del-vehiculo-electrico/> (accedido nov. 22, 2019).
- [34] M. Nogales, «Estos son los principales tipos de enchufes para coches eléctricos», *Noticias.coches.com*, jun. 09, 2019. <https://noticias.coches.com/consejos/tipos-enchufes-coches-electricos/341066>.
- [35] «Conector Scame», *Pinterest*. <https://www.pinterest.com/pin/439734351093499504/>.
- [36] CHAdeMO, «CHAdeMO. Association & Protocol». abr. 2019, [En línea]. Disponible en: https://www.chademo.com/wp2016/wp-content/uploads/2019/05/2019%20CHAdeMO_Brochure_web.pdf.
- [37] «Tesla Supercharger», *Wikipedia*. nov. 20, 2019, [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Tesla_Supercharger&oldid=927131553.
- [38] J. Martínez, «Tesla ya ofrece un adaptador de carga rápida CHAdeMO para su Model 3», *forococheselectricos*, jul. 10, 2019. <https://forococheselectricos.com/2019/07/tesla-ya-ofrece-un-adaptador-de-carga-rapida-chademo-para-su-model-3.html> (accedido abr. 23, 2020).
- [39] Import Tesla, «Supercharger en Europa», *Import Tesla*, jun. 05, 2018. <https://importtesla.com/el-supercharger-en-europa-de-tesla-motors-esta-ubicado-en-toda-la-peninsula/> (accedido abr. 23, 2020).
- [40] Standardization Administration of China, «GB/T 20234.1 - Connection set for conductive charging of electric vehicles - Part 1: General requirements». 2015.
- [41] Standardization Administration of China, «GB/T 20234.2 - Connection set for conductive charging of electric vehicles - Part 2: AC Charging Coupler». 2015.
- [42] Standardization Administration of China, «GB/T 20234.3 - Connection set for conductive charging of electric vehicles - Part 3: DC Charging Coupler». 2015.
- [43] M. Kane, «China Is Developing New GB/T Fast Charging Standard At 900 kW», *InsideEVs*. <https://insideevs.com/news/338620/china-is-developing-new-gb-t-fast-charging-standard-at-900-kw/> (accedido sep. 05, 2020).
- [44] «Modos de recarga del vehículo eléctrico», *Electromovilidad*. <http://electromovilidad.net/modos-de-recarga-del-vehiculo-electrico/> (accedido abr. 23, 2020).
- [45] P. Ibáñez, «Tipos de conectores, tipos de recarga y modos de carga», *Motorpasión*, ago. 15, 2012. <https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/tipos-de-conectores-tipos-de-recarga-y-modos-de-carga> (accedido abr. 23, 2020).



- [46] Circutor, «Recargas de vehículos eléctricos». [En línea]. Disponible en: http://docs.circutor.com/docs/CT_RVE_SP.pdf.
- [47] SCAME, «EVSE Components». [En línea]. Disponible en: <https://www.dijkman.com/files/content/scame-ev-stekkers-20190520091453.pdf>.
- [48] Comité de Comercio Exterior (COMEX), «Resolución No. 016-2019». 2019, [En línea]. Disponible en: <http://www.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/2019/06/RESOLUCIO%CC%81N-COMEX-016-2019.pdf>.
- [49] Servicio de Rentas Internas del Ecuador (SRI), «Ley Orgánica Fomento Productivo». <https://www.sri.gob.ec/web/guest/ley-organica-fomento-productivo>.
- [50] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, «Pliego Tarifario para las Empresas Eléctricas de Distribución». 2020, [En línea]. Disponible en: https://www.cnelep.gob.ec/wp-content/uploads/2020/01/pliego_tarifario_del_spee_2020_resolucion_nro_035_19.pdf.
- [51] Asamblea Nacional - República del Ecuador, «Ley Orgánica de Eficiencia Energética». 2019, [En línea]. Disponible en: <https://www.rekursyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/03/Ley-Eficiencia-Energe%CC%81tica.pdf>.
- [52] E. E. Cabezas Guerrero, «Proyecto de Ley de Fomento a la Movilidad Sostenible y Desarrollo de la Electromovilidad Tr. 360581». 2019, [En línea]. Disponible en: http://www.observatoriolegislativo.ec/media/archivos_leyes/Proyecto_de_Ley_de_Fomento_a_la_Movilidad_Sostenible.pdf.
- [53] P. Mock, J. German, A. Bandivadekar, y I. Riemersma, «Discrepancies between type-approval and “real-world” fuel-consumption and CO2 values: assessment for 2001-2011 European passenger cars». abr. 04, 2012, Accedido: mar. 29, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://theicct.org/publications/discrepancies-between-type-approval-and-real-world-fuel-consumption-and-co2-values-2001>
- [54] J. Gonder, T. Markel, M. Thornton, y A. Simpson, «Using Global Positioning System Travel Data to Assess Real-World Energy Use of Plug-In Hybrid Electric Vehicles», *SAGE Journals*, vol. 2017, pp. 26-32, ene. 2007, [En línea]. Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2017-04>.
- [55] E. A. Grunditz, «Design and Assessment of Battery Electric Vehicle Powertrain, with Respect to Performance, Energy Consumption and Electric Motor Thermal Capability», Chalmers University of Technology, Sweden, 2016.
- [56] J. Font Mezquita, *Tratado sobre automóviles. Tomo IV. La dinámica del automóvil*. España: Universidad Politécnica de Valencia Serv. Publ., 2007.
- [57] C. Fiori, K. Ahn, y H. A. Rakha, «Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation», *Appl. Energy*, vol. 168, pp. 257-268, abr. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.01.097.

- [58] R. Maia, M. Silva, R. Araújo, y U. Nunes, «Electric vehicle simulator for energy consumption studies in electric mobility systems», en *2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems*, jun. 2011, pp. 227-232, doi: 10.1109/FISTS.2011.5973655.
- [59] J. Larminie y J. Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*, Second Edition. John Wiley & Sons, Ltd., 2012.
- [60] Jairo Quirós *et al.*, «Propuesta de ubicación de la infraestructura de recarga rápida para vehículos eléctricos en Costa Rica», Universidad de Costa Rica, 2018.
- [61] Transportation Research Board, *Tires and Passenger Vehicle Fuel Economy: Informing Consumers, Improving Performance -- Special Report 286*. 2006.
- [62] G. R. D. Rado, D. S. P. García, y G. H. Devincenzi, «Análisis de las Fuerzas que Actúan en la Interface Neumático Carretera. Modelos de Simulación de Aceleración», 2013.
- [63] T. D. Gillespie, *Fundamentals of vehicle dynamics*. Society of Automotive Engineers, 1992.
- [64] «Cómo medir la presión de los neumáticos». <https://www.neumaticos-uniroyal.es/turismo/catalogo-de-neumatico/cuidado-de-los-neumaticos/como-medir-la-presion-de-los-neumaticos> (accedido abr. 23, 2020).
- [65] S. A. Velinsky y R. A. White, «Increased Vehicle Energy Dissipation Due to Changes in Road Roughness with Emphasis on Rolling Losses», *Soc. Automot. Eng.*, ene. 1979, Accedido: abr. 23, 2020. [En línea]. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/294844687_Increased_Vehicle_Energy_Dissipation_Due_to_Changes_in_Road_Roughness_with_Emphasis_on_Rolling_Losses.
- [66] L. W. DeRaad, «The Influence of Road Surface Texture on Tire Rolling Resistance», *Soc. Automot. Eng.*, Art. n.º SAE 780257, mar. 1978, Accedido: abr. 21, 2020. [En línea]. Disponible en:
<https://trid.trb.org/view/74633>.
- [67] J. Y. Wong, *Theory of Ground Vehicles*. John Wiley & Sons, 2001.
- [68] Universidad de Sevilla, «Fuerzas de rozamiento (GIE)». [http://laplace.us.es/wiki/index.php/Fuerzas_de_rozamiento_\(GIE\)](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Fuerzas_de_rozamiento_(GIE)) (accedido abr. 23, 2020).
- [69] Nick Connor, «Qué es la fuerza de arrastre - Ecuación de arrastre - Definición», *Thermal Engineering*, sep. 17, 2019. <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-fuerza-de-arrastre-ecuacion-de-arrastre-definicion/> (accedido mar. 29, 2020).
- [70] Sears y Zemansky, *Física Universitaria*, Decimosegunda., vol. 1. Addison-Wesley, 2009.
- [71] J. Van Roy, N. Leemput, S. De Breucker, F. Geth, P. Tant, y J. Driesen, «An Availability Analysis and Energy Consumption Model for a Flemish Fleet of Electric Vehicles», presentado en European Electric Vehicle Congress (EEVC), Date: 2011/10/26 - 2011/10/28, Location: Brussels, Belgium, oct. 2011, Accedido: abr. 21, 2020. [En línea]. Disponible en:
<https://lirias.kuleuven.be/1730977>.

- [72] «Principio de conservación de la energía». http://newton.cnice.mec.es/materiales_didacticos/energia/conservacion.htm (accedido abr. 23, 2020).
- [73] Conceptodefinicion.de, «¿Qué es Metodología?», *Concepto de - Definición de*. <https://conceptodefinicion.de/metodologia/> (accedido abr. 26, 2020).
- [74] «Metodología», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. abr. 09, 2020, Accedido: abr. 26, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Metodolog%C3%ADa>.
- [75] J. A. Zapata, P. Cabrera, I. Mares, y Y. Moreno, «Método Heurístico», *Metodo Heurístico*, jul. 12, 2012. <https:// analisisheurísticos.wordpress.com/metodo-heuristico/> (accedido abr. 26, 2020).
- [76] «Reproducibilidad y repetibilidad», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. feb. 04, 2020, Accedido: abr. 26, 2020. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Reproducibilidad_y_repetibilidad.
- [77] Kia Media, «Kia Soul 2018 con más autonomía». 2018, [En línea]. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwiHiL64qlbpAhVwUN8KHSJ7Aq0QFjAAegQIAhAB&url=https%3A%2F%2Fpress.kia.com%2Fcontent%2Fdam%2Fkiapress%2FES%2Fmediagallery%2FWords%2520press%2520kit%2FKia%2520Soul%2520EV%25202018.doc&usg=AOvVaw1TFmyX_2yo8bhkOqD72Tqa.
- [78] Motor Trend Staff, «Kia Soul EV 2015: Primera Prueba», *Motor Trend en Español*, nov. 20, 2014. <https://www.motortrendenespanol.com/noticias/kia-soul-ev-2015-primera-prueba/> (accedido abr. 26, 2020).
- [79] «¿Para que sirven los modos de conducción?», *Turbo*, mar. 04, 2019. <http://www.revistaturbo.com/mecanica/para-que-sirven-los-modos-de-conduccion-1767> (accedido abr. 26, 2020).
- [80] Kia, «Emergency Rescue Guide Manual. Soul EV». [En línea]. Disponible en: <https://www.kia.ca/content/ownership/downloads/firstrespond/soulev.pdf>.
- [81] «Electric car range and efficiency (EPA)», *PushEVs*. <https://pushevs.com/electric-car-range-efficiency-epa/> (accedido abr. 26, 2020).
- [82] CodigosDTC.com, «¿Qué es el protocolo OBD2 y cómo funciona?», 2018. <https://codigosdtc.com/obd2/> (accedido abr. 26, 2020).
- [83] F. Bocanegra Gallardo, «Extraction and analysis of car driving data via OBD-II», Universidad Miguel Hernández, Elche, 2018.
- [84] mundocarros.info, «Computadora automotriz», *Mundo Carros*, nov. 21, 2019. <https://mundocarros.info/computadora-automotriz-ecu/> (accedido abr. 26, 2020).
- [85] C.-M. Tseng, W. Zhou, M. Al-Hashmi, C.-K. Chau, S. G. Song, y E. Wilhelm, «Data extraction from electric vehicles through OBD and application of carbon footprint evaluation | Request PDF», jun. 2016, Accedido: abr. 26, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/304021529_Data_extraction_from_electric_vehicles_through_OBD_and_application_of_carbon_footprint_evaluation.



- [86] «El OBDII Completo/Herramientas de Diagnostico/ELM327». https://es.wikibooks.org/wiki/El_OBDII_Completo/Herramientas_de_Diagnostico/ELM327 (accedido abr. 26, 2020).
- [87] «ELM327», *aliexpress.com*. https://es.aliexpress.com/item/32924014481.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp= (accedido abr. 26, 2020).
- [88] Huawei, «Huawei Mate 20 lite especificaciones». <https://consumer.huawei.com/latin/phones/mate20-lite/specs/> (accedido abr. 26, 2020).
- [89] Huawei, «Huawei Mate 20 lite». <https://consumer.huawei.com/latin/phones/mate20-lite/> (accedido abr. 26, 2020).
- [90] «Garmin Monterra, GPS Android con WiFi y cámara HD», *Zona Outdoor*, jun. 24, 2013. <https://www.zonaoutdoor.es/garmin-monterra-gps-android-con-wifi-y-camara-hd> (accedido abr. 26, 2020).
- [91] «Garmin Monterra: sorprendente GPS de outdoor Android y con Wi-Fi», oct. 14, 2013. <https://www.tradesport.com/outdoor/20131014/garmin-monterra-sorprendente-gps-de-outdoor-android-y-con-wi-fi.aspx> (accedido abr. 26, 2020).
- [92] «Garmin Monterra», *TyreToTravel* *EN*. <http://www.tyretotravel.com/product/garmin-monterra/> (accedido abr. 26, 2020).
- [93] JejuSoul, *JejuSoul/OBD-PIDs-for-HKMC-EVs/Soul EV - 27kWh/*. 2020.
- [94] S. Coast, «OpenStreetMap», *OpenStreetMap*. <https://www.openstreetmap.org/> (accedido abr. 26, 2020).
- [95] «GPX to XLSX Converter Online». <https://mygeodata.cloud/converter/gpx-to-xlsx> (accedido abr. 26, 2020).
- [96] «uTrack - online GPX track report generator». <http://utrack.crempa.net/> (accedido abr. 26, 2020).
- [97] W. Díaz y R. Díaz, «Mediciones Industriales: 4.- Teoría de error: tipos de error y su cálculo», *MEDICIONES INDUSTRIALES*. <https://medind10ma.blogspot.com/2017/07/4-teoria-de-error-tipos-de-error-y-su.html> (accedido abr. 26, 2020).
- [98] Sensing S.L., «Equipos de adquisición de datos», *Sensing, Sensores de Medida*. <https://sensores-de-medida.es/medicion/equipos-de-adquisicion-de-datos/> (accedido abr. 26, 2020).
- [99] Omega Engineering, «Sistema de adquisición de datos». <https://es.omega.com/prodinfo/adquisicion-de-datos.html> (accedido abr. 26, 2020).
- [100] «Frecuencia de muestreo», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. jul. 29, 2019, Accedido: abr. 26, 2020. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Frecuencia_de_muestreo.
- [101] H. Mora, «1.2.-Sistemas de adquisición y Procesamiento de datos». 2011, [En línea]. Disponible en: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/19119/1/Sistemas%20de%20adquisici%C3%B3n%20y%20Procesamiento%20de%20datos.pdf>.



- [102] P. S. Barros Ojeda y F. E. Ordóñez Domínguez, «Estudio de la influencia en la frecuencia de muestreo en dispositivos de recolección de datos en OBD II mediante análisis de varianza», nov. 2018, Accedido: abr. 26, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16525>.
- [103] Alonso, «3 Exactitud, precisión y error», feb. 13, 2013. https://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node26_mn.html (accedido abr. 26, 2020).
- [104] Garmin, «Precisión de las lecturas de distancia/velocidad». <https://support.garmin.com/es-AR/?faq=lcyYpjUzRZ8vwH6C107CE8> (accedido abr. 26, 2020).
- [105] R. Peco, «GPS en el móvil: adiós a los 10 metros de error», *La Vanguardia*, feb. 28, 2020. <https://www.lavanguardia.com/tecnologia/20200228/473813311658/gps-geocalizacion-telefono-movil-smartphone-conduccion-coche-vehiculo.html> (accedido abr. 26, 2020).
- [106] «¿Qué es y para qué sirve el GPS?» <https://www.azimutmarine.es/sistema-posicionamiento-gps> (accedido abr. 26, 2020).
- [107] A. I. Díaz, «Calculadora Geoespacial». 2012, [En línea]. Disponible en: http://41jaiio.sadio.org.ar/sites/default/files/41_EST_2012.pdf.
- [108] José Miguel, «¿Cómo calcular la distancia entre dos puntos geográficos en C#? (Fórmula de Haversine)», abr. 28, 2011. <https://www.genbeta.com/desarrollo/como-calcular-la-distancia-entre-dos-puntos-geograficos-en-c-formula-de-haversine> (accedido abr. 27, 2020).
- [109] S. S. Mendoza Leonidez y Y. Domínguez Sánchez, «Radio Terrestre», *geodinamicainterna-1*, 2015. <https://geodinamicainterna.wixsite.com/geodinamicainterna-1/radio-terrestre> (accedido abr. 27, 2020).
- [110] «Calcular una pendiente». <https://www.calculartodo.com/edificio/calcular-una-pendiente.php> (accedido abr. 27, 2020).
- [111] Real Academia de Ingeniería, «Densidad del aire». <http://diccionario.raing.es/es/lema/densidad-del-aire> (accedido abr. 27, 2020).
- [112] D. Giacosa, *Motores endotérmicos*, Tercera Edición. Dossat, S.A., 1979.
- [113] Engineering ToolBox, «U.S. Standard Atmosphere», 2003. https://www.engineeringtoolbox.com/standard-atmosphere-d_604.html (accedido abr. 27, 2020).
- [114] «Interpolación lineal», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. oct. 22, 2019, Accedido: abr. 27, 2020. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Interpolaci%C3%B3n_lineal&oldid=120653091.
- [115] «2016 KIA Soul EV - Specifications», *EVSSpecifications*. <https://www.evspecifications.com/en/model/8ce695> (accedido abr. 27, 2020).
- [116] «Aerodinámica en el vehículo. Resistencia aerodinámica», abr. 24, 2014. <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/04/24/aerodinamica-en-el-vehiculo-resistencia-aerodinamica/> (accedido abr. 27, 2020).



- [117] S. C. Yang, M. Li, Y. Lin, y T. Q. Tang, «Electric vehicle's electricity consumption on a road with different slope», *Phys. Stat. Mech. Its Appl.*, vol. 402, n.º C, pp. 41-48, 2014, Accedido: ago. 18, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://ideas.repec.org/a/eee/phsmap/v402y2014icp41-48.html>.
- [118] Agencia Nacional de Tránsito, «Reglamento a ley de transporte terrestre tránsito y seguridad vial». 2012, [En línea]. Disponible en: <https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/03/Decreto-Ejecutivo-No.-1196-de-11-06-2012-REGLAMENTO-A-LA-LEY-DE-TRANSPORTE-TERRESTRE-TRANSITO-Y-SEGURIDAD-VIA.pdf>.
- [119] Y. Wu, M. Yang, H. Zhang, K. Chen, y Y. Wang, «Optimal Site Selection of Electric Vehicle Charging Stations Based on a Cloud Model and the PROMETHEE Method», *Energies*, mar. 2016, Accedido: may 13, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/297594398_Optimal_Site_Selection_of_Electric_Vehicle_Charging_Stations_Based_on_a_Cloud_Model_and_the_PROMETHEE_Method.
- [120] O. Egbue y S. Long, «Barriers to widespread adoption of electric vehicles: An analysis of consumer attitudes and perceptions», *Energy Policy*, vol. 48, pp. 717-729, sep. 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2012.06.009.
- [121] H. A. Bonges y A. C. Lusk, «Addressing electric vehicle (EV) sales and range anxiety through parking layout, policy and regulation», *Transp. Res. Part Policy Pract.*, vol. 83, pp. 63-73, ene. 2016, doi: 10.1016/j.tra.2015.09.011.
- [122] A. Karakitsiou, A. Migdalas, y P. M. Pardalos, «Optimal Location Problems for Electric Vehicles Charging Stations: Models and Challenges», en *Open Problems in Optimization and Data Analysis*, P. M. Pardalos y A. Migdalas, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 49-60.
- [123] A. Colmenar-Santos, C. De Palacio, D. Borge-Diez, y O. Monzón-Alejandro, «Planning Minimum Interurban Fast Charging Infrastructure for Electric Vehicles: Methodology and Application to Spain», *Energies*, vol. 7, n.º 3, Art. n.º 3, mar. 2014, doi: 10.3390/en7031207.
- [124] International Energy Agency, «Global EV Outlook 2018», *IEA*, 2018. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2018> (accedido oct. 02, 2020).
- [125] BYD, «BYD entrega a Guayaquil la electrolinera más grande de Ecuador», nov. 09, 2019. <https://bydelectrico.com/ec/2019/11/08/byd-entrega-a-guayaquil-la-electrolinera-mas-grande-de-ecuador/> (accedido sep. 03, 2020).
- [126] Kia, «Manual Kia Soul EV 2016 - Manual del propietario». [En línea]. Disponible en: <https://carmanuals2.com/get/kia-soul-ev-2016-manual-del-propietario-106576>.
- [127] H. Wu y D. Niu, «Study on Influence Factors of Electric Vehicles Charging Station Location Based on ISM and FMICMAC», *Sustainability*, vol. 9, n.º 4, Art. n.º 4, abr. 2017, doi: 10.3390/su9040484.
- [128] Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero, «Procedimiento para la autorización de factibilidades de nuevos centros de distribución». oct. 29, 2013, [En línea]. Disponible en:



- <https://www.controlhidrocarburos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/06/RO-111-29-octubre-de-2016.pdf>.
- [129] Consorcio USAENE, Unidad de Planeación Minero Energética, y Resultado web con enlaces de partes del sitio, «Establecer Recomendaciones en Materia de Infraestructura de Recarga para la Movilidad Eléctrica en Colombia para los Diferentes Segmentos: Buses, motos, taxis, BRT.» dic. 10, 2019, [En línea]. Disponible en: https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/Consorcio_Usaene_sumatoria_producto_3_estaciones_de_cargaVF.pdf.
- [130] Empresas Públicas de Medellín, «Norma Técnica: Instalación de estaciones de carga para vehículos eléctricos». feb. 15, 2019, [En línea]. Disponible en: <https://www.epm.com.co/site/Portals/3/documentos/Energia/RA8-031/RA8-031-INSTALACION%20ESTACIONES%20CARGA%20VEHICULOS.PDF?ver=2019-05-10-141736-840>.
- [131] SerAutonomo.net, «Definición de presupuesto». <https://www.serautonomo.net/presupuesto> (accedido sep. 03, 2020).
- [132] M. Nicholas, «Estimating electric vehicle charging infrastructure costs across major U.S. metropolitan areas», *International Council on Clean Transportation*, dic. 2019, [En línea]. Disponible en: <https://theicct.org/publications/charging-cost-US>.
- [133] J. Agenbroad, «Pulling Back the Veil on EV Charging Station Costs», *Rocky Mountain Institute*, abr. 29, 2014. <https://rmi.org/pulling-back-veil-ev-charging-station-costs/> (accedido sep. 03, 2020).
- [134] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, «Mapa Nro. 1: Organización territorial del Estado». <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/05/Organizaci%C3%B3n-territorial-del-Estado.pdf>.
- [135] Instituto Nacional de Estadística y Censos, «Proyecciones Poblacionales», *Instituto Nacional de Estadística y Censos*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/proyecciones-poblacionales/> (accedido sep. 03, 2020).
- [136] «Cuenca (Ecuador)», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. ago. 25, 2020, Accedido: sep. 03, 2020. [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Cuenca_\(Ecuador\)&oldid=128738168](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Cuenca_(Ecuador)&oldid=128738168).
- [137] «Guayaquil», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. ago. 29, 2020, Accedido: sep. 03, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Guayaquil&oldid=128861622>.
- [138] «Vía Colectora Cuenca-Puerto Inca», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. sep. 04, 2019, Accedido: sep. 03, 2020. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=V%C3%ADa_Colectora_Cuenca-Puerto_Inca&oldid=118926676.
- [139] Ministerio de Transporte y Obras Públicas, «Mapa del estado de la red vial estatal», abr. 2020. <https://www.obraspublicas.gob.ec/wp->



- content/uploads/downloads/2020/05/RVE_Mapa_Vial_Ecuador_ABRIL2020.pdf.
- [140] «Ministerio de Transporte y Obras Públicas». <https://www.obraspublicas.gob.ec/> (accedido oct. 03, 2020).
- [141] Ministerio del Ambiente, «Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador». <http://areasprotegidas.ambiente.gob.ec/es/info-snap> (accedido sep. 03, 2020).
- [142] Europarc España, «Qué son las áreas protegidas». <http://www.redeuroparc.org/observatorio/quesonlasareasprotegidas> (accedido sep. 03, 2020).
- [143] Ministerio del Ambiente, «Parque Nacional Cajas | Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador». <http://areasprotegidas.ambiente.gob.ec/areas-protegidas/parque-nacional-cajas> (accedido sep. 03, 2020).
- [144] Ministerio del Ambiente, «Reserva Ecológica Manglares Churute | Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador». <http://areasprotegidas.ambiente.gob.ec/areas-protegidas/reserva-ecol%C3%B3gica-manglares-churute> (accedido sep. 03, 2020).
- [145] Ministerio del Ambiente, «Áreas protegidas del Ecuador». [En línea]. Disponible en: <http://suia.ambiente.gob.ec/documents/10179/346525/Areas+Protegidas+del+Ecuador.pdf/390b099f-6f57-4d38-bf17-cea3a138caf5>.
- [146] «ArcGIS - Mapa del Sistema Nacional de las Áreas Protegidas del Ecuador». <https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=26f5b66d25ce44b8b0278902049bb7c3> (accedido sep. 03, 2020).
- [147] Worldmeteo, «El tiempo en Cuenca, Ecuador». <https://www.worldmeteo.info/es/america-del-sur/ecuador/cuenca/tiempo-101293/> (accedido sep. 03, 2020).
- [148] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, «Áreas de prestación del servicio público de energía». <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/05/%C3%81reas-de-prestaci%C3%B3n-del-servicio-p%C3%ABlico-de-energ%C3%ADa-el%C3%A9ctrica.pdf>.
- [149] «Geoportal - EERCS». <https://geoinformacion.centrosur.gob.ec/GeoportalEERCS/> (accedido sep. 03, 2020).
- [150] «Geoportal CNELEP». <https://geoportal.cnelep.gob.ec/cnel/> (accedido sep. 03, 2020).
- [151] D. S. Carpio Pauta y D. F. Marín Iñiguez, «Instructivo para la elaboración de diseños de redes de distribución e instalaciones interiores aplicables en la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C. A.», 2017, Accedido: sep. 03, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28532>.
- [152] Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador, «Anuario 2019». <https://www.aeade.net/anuario/> (accedido sep. 03, 2020).
- [153] ABB, «Terra 54 CJG - DC Fast Charger». <https://new.abb.com/ev-charging/products/car-charging/dc-fast-chargers/terra-54-cjg> (accedido sep. 03, 2020).



- [154] ABB, «Datasheet Terra 54 multi-standard DC charging station». [En línea]. Disponible en: https://library.e.abb.com/public/9f72c044f8ab4ff29c5ae0eb915c0843/4EVC901707-LFEN_Terra%2054_11_19.pdf.
- [155] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, «Regulación Nro. ARCONEL 004/18». 2018, [En línea]. Disponible en: <https://www.regulacioneolica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/03/043-18.pdf>.
- [156] Ministerio del Ambiente y Agua, «Parque Nacional Cajas». <https://www.ambiente.gob.ec/parque-nacional-cajas/> (accedido oct. 02, 2020).
- [157] Ministerio de Transporte y Obras Públicas, «MTOPE trabaja en la vía Cuenca – Molleturo – El Empalme». <https://www.obraspublicas.gob.ec/mtop-trabaja-en-la-via-cuenca-molleturo-el-empalme/> (accedido sep. 03, 2020).
- [158] «Yaguachi Nuevo». https://es.wikipedia.org/wiki/Yaguachi_Nuevo (accedido oct. 02, 2020).
- [159] A. Arellano Martínez, D. Mireles Huerta, y R. de J. Samayoa Castillo, «Mejora de la confiabilidad en el edificio Valdés Vallejo de la UNAM», Universidad Nacional Autónoma de México, 2011.
- [160] Transmission and Distribution Committee y of the IEEE Power and Energy Society, «IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality», *IEEE Std 1159-2019 Revis. IEEE Std 1159-2009*, pp. 1-98, ago. 2019, doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8796486.
- [161] C. C. Paipa Bocanegra y J. C. Ramírez García, «Análisis y Evaluación del Comportamiento del THDi a Causa de la Conexión Masiva de Vehículos Eléctricos en una Estación de Carga», 2016.
- [162] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, «Regulación Nro. ARCONEL 005/18». 2018.
- [163] RTR Energía, «Los Armónicos y la Calidad de la Energía Eléctrica». [En línea]. Disponible en: <http://fotosdeelectricidad.es/wp-content/uploads/2012/11/Armonicos.-RTR.pdf>.
- [164] E. Téllez Ramírez, «Distorsión armónica». [En línea]. Disponible en: <https://agngroup.net/papers/Distorsion%20Armonica.pdf>.
- [165] Schneider Electric, «5. Detección y filtrado de armónicos». [En línea]. Disponible en: http://automata.cps.unizar.es/bibliotecaschneider/BT/Guia/5_Armonicos.
- [166] Circutor, «Procedimientos para el estudio y análisis de perturbaciones armónicas». [En línea]. Disponible en: http://circutor.com/docs/procedimientos_sp.pdf.
- [167] IEC, «IEC 61000-2-2 Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 2-2:Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems.» sep. 29, 2000, [En línea]. Disponible en: <https://grouper.ieee.org/groups/harmonic/iharm/61000-2-2.pdf>.
- [168] F. Fornieles, «Diferencia entre coseno de phi y factor de potencia», *Francesc Fornieles*, mar. 11, 2018. <https://fornieles.es/perturbaciones>



- electricas/diferencia-coseno-phi-y-factor-potencia/ (accedido ago. 20, 2020).
- [169] V. P. Guachamín Cheza y E. G. Naranjo Andrade, «Análisis y Estudio de la Calidad de Energía Eléctrica en la planta industrial de Quito Imprenta Mariscal», Escuela Politécnica Nacional, 2011.
- [170] G. Orellana y J. Marcelo, «Análisis de calidad de energía eléctrica en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca», Universidad de Cuenca, 2019.
- [171] J. M. Ruíz Vallejo y F. H. Ortíz Quintero, «Metodologías para identificar fuentes armónicas en sistemas eléctricos», Universidad Tecnológica de Pereira, 2007.
- [172] AEMC Instruments, «PowerPad® III Model 8333», *AEMC Instruments*. <https://www.aemc.com/products/power-analyzers/power-8333> (accedido ago. 20, 2020).
- [173] G. Enríquez Harper, *Manual de instalaciones eléctricas residenciales e industriales*. Editorial Limusa, 2004.



Anexos

Anexo #1: Planilla de viaje

Equipos empleados:

- ELM327
- Celular – aplicación / Torque Pro
- GPS calibrado (frecuencia de muestreo y mapas de carreteras nacionales)
- Carga adicional: sacos de cemento – 50 kg (Opcional)

Número de Ocupantes (O): _____

Fechas (d/m/a): _____ / _____ / _____

Masas [kg]: Piloto _____ / Copiloto _____ / O3 _____ / O4 _____ / O5 _____ / Equipaje _____

| | Inicio (h : m : s) | Parada (h : m : s) | Lugar/Sector | Longitud | Latitud | Altitud | SoC % | Autonomía (km) | Distancia recorrida (km) |
|----|--------------------|--------------------|--------------|----------|---------|---------|-------|----------------|--------------------------|
| T1 | | | | | | | | | |
| T2 | | | | | | | | | |
| T3 | | | | | | | | | |
| T4 | | | | | | | | | |
| T5 | | | | | | | | | |
| T6 | | | | | | | | | |
| . | | | | | | | | | |
| . | | | | | | | | | |
| . | | | | | | | | | |

Anexo #2: Muestra del registro de los primeros datos del VE obtenidos a través del programa Torque Pro en una ruta de ensayo

| Device Time | Longitude | Latitude | GPS Speed (Meters/second) | Altitude | GPS Accuracy(m) | Trip Distance(km) | Trip Time(s) | Cumulative Energy Charged(kWh) | Cumulative Energy Discharged(kWh) | State of Charge (BS%) | State of Charge Display(%) |
|-------------------------|--------------|--------------|---------------------------|-------------|-----------------|-------------------|--------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| 09jun-2020 15:11:45.042 | -79.038593 | -2.89193975 | 0 | 2595.90836 | 0 | 2595.90836 | 0 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:11:46.040 | -79.03846128 | -2.891963579 | 2.71378 | 2597.52414 | 24.1283503 | - | 1 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:11:47.040 | -79.03843891 | -2.891869943 | 2.85425 | 27.85649109 | 0.00279963 | 0.00279963 | 2 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:11:48.039 | -79.03841638 | -2.891877277 | 2.5017622 | 2599.581328 | 26.71189117 | 0.00522205 | 3 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:11:49.043 | -79.03839389 | -2.891894824 | 2.4888352 | 2600.823842 | 21.8331559 | 0.0078616 | 4 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:11:50.048 | -79.03836808 | -2.891894002 | 2.6870253 | 2502.140318 | 21.47344208 | 0.01079287 | 5 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:11:51.040 | -79.03834439 | -2.89189524 | 2.60256 | 2602.632638 | 0.0136138 | 0.0136138 | 6 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:11:52.041 | -79.0383198 | -2.891899215 | 3.2122911 | 2604.769217 | 20.52822113 | 0.01637009 | 7 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:11:53.040 | -79.03829622 | -2.891895441 | 2.3161383 | 2606.816203 | 19.1879821 | 0.01902394 | 8 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:11:54.039 | -79.03826967 | -2.891892503 | 2.9097488 | 2608.780566 | 18.70074668 | 0.02197241 | 9 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:11:55.039 | -79.0382356 | -2.891891595 | 3.5991846 | 2610.772853 | 18.11268997 | 0.02577293 | 10 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:11:56.039 | -79.03820032 | -2.891902069 | 4.039611 | 2611.554537 | 18.26719452 | 0.02979911 | 11 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:11:57.042 | -79.03816363 | -2.891911716 | 4.4863277 | 2611.856752 | 17.5893431 | 0.03426624 | 12 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:11:58.045 | -79.03812414 | -2.891942328 | 4.903298 | 2611.844308 | 16.80372673 | 0.03848379 | 13 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:11:59.039 | -79.03808666 | -2.891971973 | 5.1530867 | 2611.776937 | 17.74181175 | 0.04461388 | 14 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:12:00.044 | -79.03806154 | -2.892004658 | 4.9501176 | 2611.539126 | 16.56786553 | 0.04931989 | 15 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:12:01.042 | -79.03803959 | -2.892045328 | 4.8399715 | 2611.816338 | 15.78338431 | 0.05410171 | 16 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:12:02.040 | -79.03803591 | -2.892102111 | 4.2221034 | 2611.263026 | 15.95655441 | 0.06071129 | 17 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:12:03.041 | -79.03803759 | -2.892150071 | 5.7157177 | 2611.933579 | 16.16225433 | 0.06668098 | 18 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:12:04.040 | -79.0380462 | -2.892207499 | 5.3619647 | 2612.019489 | 16.8924408 | 0.07244757 | 19 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:12:05.042 | -79.03805427 | -2.892250468 | 4.656957 | 2612.089639 | 16.3392469 | 0.07726203 | 20 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:12:06.048 | -79.03805676 | -2.892280423 | 3.69183 | 2612.316882 | 16.24662045 | 0.0806328 | 21 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:12:07.039 | -79.03806259 | -2.892305887 | 2.7644446 | 2612.663031 | 16.0834053 | 0.08348053 | 22 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:12:08.040 | -79.03807607 | -2.892330869 | 2.6242694 | 2613.038982 | 15.91527691 | 0.08583337 | 23 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:12:09.044 | -79.03808789 | -2.892359694 | 2.95679 | 2614.033629 | 15.63374429 | 0.08785959 | 24 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:12:10.041 | -79.03812517 | -2.892332016 | 3.99808 | 2614.532617 | 14.85455418 | 0.09138189 | 25 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:12:11.040 | -79.03815761 | -2.892320829 | 4.848406 | 2615.45246 | 16.83140373 | 0.09519432 | 26 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:12:12.040 | -79.03820086 | -2.892305258 | 5.6861716 | 2616.522514 | 15.90827969 | 0.10028173 | 27 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 100 |
| 09jun-2020 15:12:13.040 | -79.03825086 | -2.892290868 | 6.3305376 | 2617.438111 | 15.77813625 | 0.1069916 | 28 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:14.043 | -79.03831198 | -2.892277092 | 6.84977 | 2618.53682 | 16.03283419 | 0.11303683 | 29 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:15.039 | -79.03838237 | -2.89225157 | 7.729687 | 2619.799163 | 16.77632332 | 0.12179628 | 30 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:16.043 | -79.03845798 | -2.892226384 | 8.420613 | 2620.822192 | 18.3070151 | 0.13016273 | 31 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:17.041 | -79.03853807 | -2.892204717 | 8.851839 | 2621.666587 | 18.96494865 | 0.13844674 | 32 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:18.038 | -79.03862666 | -2.892183688 | 9.328986 | 2622.287146 | 19.69778633 | 0.14688744 | 33 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:19.042 | -79.03871988 | -2.892160817 | 9.747703 | 2622.68868 | 19.89155642 | 0.16023514 | 34 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:20.043 | -79.03881827 | -2.892139714 | 10.451407 | 2623.098986 | 20.30655594 | 0.17132737 | 35 | 1424.19951 | 1392.90024 | 95 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:21.047 | -79.03892984 | -2.892114835 | 11.080398 | 2623.216319 | 22.78966141 | 0.18413454 | 36 | 1424.19951 | 1392.90024 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:22.046 | -79.03902356 | -2.89209712 | 11.177926 | 2623.86284 | 23.50929064 | 0.19472736 | 37 | 1424.19951 | 1392.90024 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:23.042 | -79.03912065 | -2.892074941 | 11.330822 | 2624.371911 | 23.19955116 | 0.20579711 | 38 | 1424.19951 | 1392.90024 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:24.039 | -79.03921884 | -2.89205588 | 11.897891 | 2624.884182 | 21.8976861 | 0.21702817 | 39 | 1424.19951 | 1392.90024 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:25.041 | -79.03932252 | -2.89204298 | 12.493814 | 2625.25437 | 16.56117249 | 0.22853106 | 40 | 1424.19951 | 1392.90024 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:26.039 | -79.03941986 | -2.89203687 | 11.670868 | 2625.827951 | 18.13459778 | 0.23937692 | 41 | 1424.19951 | 1392.90024 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:27.043 | -79.03952027 | -2.8920298 | 10.989259 | 2626.683958 | 16.1983824 | 0.24861625 | 42 | 1424.19951 | 1392.90024 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:28.040 | -79.03962826 | -2.892023608 | 9.277818 | 2627.598684 | 15.86484118 | 0.25632637 | 43 | 1424.19951 | 1392.90024 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:29.042 | -79.03964877 | -2.891993398 | 8.182215 | 2628.780184 | 14.80203152 | 0.26090566 | 44 | 1424.19951 | 1392.90024 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:30.039 | -79.03970021 | -2.891920965 | 6.6576676 | 2629.838018 | 14.35460567 | 0.27403167 | 45 | 1424.19951 | 1392.90024 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:31.041 | -79.03975064 | -2.891897053 | 6.030697 | 2631.193084 | 13.6089896 | 0.2807765 | 46 | 1424.19951 | 1392.90024 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:32.042 | -79.03980389 | -2.891862216 | 6.251653 | 2632.114213 | 14.8998398 | 0.28712982 | 47 | 1424.19951 | 1392.90024 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:33.043 | -79.03985592 | -2.891848828 | 2633.10339 | 13.25625761 | 0.29322517 | 0.29322517 | 48 | 1424.19951 | 1392.90024 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:34.041 | -79.03991259 | -2.891823931 | 7.048972 | 2633.893359 | 13.18736458 | 0.2998262 | 49 | 1424.19951 | 1392.90024 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:35.040 | -79.03996274 | -2.891802862 | 8.22849 | 2634.609495 | 14.2819848 | 0.30521648 | 50 | 1424.19951 | 1393 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:36.041 | -79.04002708 | -2.891774302 | 8.658907 | 2635.142651 | 13.18331074 | 0.31171430 | 51 | 1424.19951 | 1393 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:37.043 | -79.04014394 | -2.891740666 | 9.563052 | 2635.609944 | 14.57741451 | 0.32741678 | 52 | 1424.19951 | 1393 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:38.038 | -79.04023424 | -2.891706191 | 9.978874 | 2636.896888 | 13.29695129 | 0.33819546 | 53 | 1424.19951 | 1393 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:39.040 | -79.04032892 | -2.891684273 | 10.356989 | 2638.372937 | 14.61663246 | 0.34942478 | 54 | 1424.19951 | 1393 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:40.041 | -79.04041196 | -2.891651847 | 10.5014 | 2639.182476 | 14.62891186 | 0.36044186 | 55 | 1424.19951 | 1393 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:41.044 | -79.04048792 | -2.891657618 | 10.604864 | 2636.940533 | 13.18364534 | 0.37183139 | 56 | 1424.19951 | 1393 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:42.044 | -79.04057872 | -2.891491436 | 10.769878 | 2637.119743 | 13.3603611 | 0.38341859 | 57 | 1424.19951 | 1393 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:43.042 | -79.04066572 | -2.89142956 | 10.800385 | 2637.121531 | 14.83891023 | 0.39459592 | 58 | 1424.19951 | 1393 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:44.043 | -79.04070026 | -2.891322904 | 11.389907 | 2637.184445 | 13.9898916 | 0.40654328 | 59 | 1424.19951 | 1393 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:45.039 | -79.04074787 | -2.891216593 | 11.784899 | 2637.304078 | 15.28807472 | 0.41940457 | 60 | 1424.19951 | 1393 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:46.040 | -79.04078991 | -2.89112139 | 9.974992 | 2637.882115 | 13.96626666 | 0.43018857 | 61 | 1424.19951 | 1393 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:47.044 | -79.04082929 | -2.891034828 | 8.3733425 | 2637.868807 | 15.2445578 | 0.44038508 | 62 | 1424.19951 | 1393 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:48.045 | -79.04082165 | -2.890991721 | 6.178007 | 2637.814862 | 14.47448223 | 0.44571707 | 63 | 1424.19951 | 1393 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:49.049 | -79.04084714 | -2.890951144 | 5.300849 | 2638.083304 | 16.68584933 | 0.45102423 | 64 | 1424.19951 | 1393 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:50.039 | -79.04086592 | -2.890930029 | 3.920028 | 2638.764849 | 20.51659203 | 0.45414141 | 65 | 1424.19951 | 1393 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:51.041 | -79.04088149 | -2.890912946 | 3.2226163 | 2639.146348 | 20.78675494 | 0.45671621 | 66 | 1424.19951 | 1393 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:52.042 | -79.04090056 | -2.890873829 | 4.1261415 | 2639.564459 | 16.98063067 | 0.46152568 | 67 | 1424.19951 | 1393 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:53.043 | -79.04091404 | -2.890853092 | 5.900622 | 2639.583683 | 16.01983383 | 0.4660739 | 68 | 1424.19951 | 1393 | 94.5 | 99.5 |
| 09jun-2020 15:12:54.040 | -79.04091039 | -2.89079525 | 6.6634626 | 2639.495989 | 16.82450294 | 0.47080091 | 69 | 14 | | | |

Anexo #3: Resultados de las simulaciones del modelo matemático implementado en cada una de las rutas de prueba de validación

- Ruta Cuenca – Molleturo

The screenshot shows the MATLAB environment with the following components:

- File Explorer:** Shows the current folder path: C:\Users\Usuario\Desktop\Trabajo Titulación\Rutas\Ruta Cuenca - Molleturo tarde. Files include GPS, Mapa, Comparación C-M.xlsx, Modelo.m, Modelo_Anexo.m, Modelor.m, Ruta1.xlsx, Ruta CM.xlsx, Ruta MC.xlsx, trackLog-2020-jun.-RCM.csv, and trackLog-2020-jun.-RMC.csv.
- Workspace:** A table listing variables and their values:

| Name | Value |
|--------------------|---------------|
| a | 2.4751e-13 |
| Af | 2.0060 |
| alt | 3954x1 double |
| alt2 | 3954x1 double |
| angulo_ruta | 3953x1 double |
| angulo_ruta_grados | 3953x1 double |
| aprom | 3953x1 double |
| c | 9.9501e-07 |
| Cx | 0.3500 |
| D | 0.0063 |
- Code Editor:** Shows MATLAB code for the 'Ruta de ida' simulation:

```
154 - end
155 - if v(i) >= 5
156 -     nrb(i) = 0.5 + 0.3 * (v(i) - 5) / 20;
157 - end
158 - end
```
- Command Window:** Displays the following results:

```
Distancia_recorrida =
    63.426613613804221

Energia_bat_descarga =
    13.742799947768727

Energia_bat_carga =
   -4.907953967532602

Energia_bat_neta =
     8.834845980236125
```

The screenshot shows the MATLAB environment with the following components:

- File Explorer:** Shows the current folder path: C:\Users\Usuario\Desktop\Trabajo Titulación\Rutas\Ruta Cuenca - Molleturo tarde. Files include GPS, Mapa, Comparación C-M.xlsx, Modelo.m, Modelo_Anexo.m, Modelor.m, Ruta1.xlsx, Ruta CM.xlsx, Ruta MC.xlsx, trackLog-2020-jun.-RCM.csv, and trackLog-2020-jun.-RMC.csv.
- Workspace:** A table listing variables and their values:

| Name | Value |
|--------------------|---------------|
| a | 0 |
| Af | 2.0060 |
| alt | 3615x1 double |
| alt2 | 3615x1 double |
| angulo_ruta | 3614x1 double |
| angulo_ruta_grados | 3614x1 double |
| aprom | 3614x1 double |
| c | 0 |
| Cx | 0.3500 |
| D | 0 |
- Code Editor:** Shows MATLAB code for the 'Ruta de regreso' simulation:

```
151 - for i=1:length(v)
152 -     if v(i) < 5
153 -         nrb(i) = 0.5 * v(i) / 5;
154 -     end
155 -     if v(i) >= 5
```
- Command Window:** Displays the following results:

```
Distancia_recorrida =
    62.702960434826366

Energia_bat_descarga =
    14.301099953151580

Energia_bat_carga =
   -5.023303458064439

Energia_bat_neta =
     9.277796495087141
```



- **Ruta Cuenca – Molleturo con masa adicional de 200 kg**

Ruta de ida

06/09/20 16:47 MATLAB Command Window

```
Distancia_recorrida =  
    52.460892283970196  
  
Energia_bat_descarga =  
    13.094691638865649  
  
Energia_bat_carga =  
   -3.184988058888790  
  
Energia_bat_neta =  
    9.909703579976860  
  
>>
```

Ruta de regreso

06/09/20 16:48 MATLAB Command Window

```
Distancia_recorrida =  
    52.689882155845197  
  
Energia_bat_descarga =  
    10.851222363817746  
  
Energia_bat_carga =  
   -5.134959051528097  
  
Energia_bat_neta =  
    5.716263312289649  
  
>>
```

- **Ruta Cuenca – Cañar**

Ruta de ida

06/09/20 16:49 MATLAB Command Window

```
Distancia_recorrida =  
    61.250629455882752  
  
Energia_bat_descarga =  
    13.338103730621087  
  
Energia_bat_carga =  
   -2.604559534091476  
  
Energia_bat_neta =  
    10.733544196529612  
  
>>
```

Ruta de regreso

06/09/20 16:49 MATLAB Command Window

```
Distancia_recorrida =  
    62.151317897090721  
  
Energia_bat_descarga =  
    8.954995610974242  
  
Energia_bat_carga =  
   -4.112734352577808  
  
Energia_bat_neta =  
    4.842261258396434  
  
>>
```



- **Ruta Cuenca – Cañar con masa adicional de 200 kg**

| Ruta de ida | | Ruta de regreso | |
|------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------------|
| <u>06/09/20 16:50</u> | <u>MATLAB Command Window</u> | <u>06/09/20 16:51</u> | <u>MATLAB Command Window</u> |
| Distancia_recorrida = | | Distancia_recorrida = | |
| 63.850738803355171 | | 62.962284187681142 | |
| Energia_bat_descarga = | | Energia_bat_descarga = | |
| 16.228263130788616 | | 11.166559350738760 | |
| Energia_bat_carga = | | Energia_bat_carga = | |
| -2.625669450253745 | | -5.549051491061508 | |
| Energia_bat_neta = | | Energia_bat_neta = | |
| 13.602593680534870 | | 5.617507859677252 | |
| >> | | >> | |

- **Ruta Cuenca – Léntag**

| Ruta de ida | | Ruta de regreso | |
|------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------------|
| <u>06/09/20 16:52</u> | <u>MATLAB Command Window</u> | <u>06/09/20 16:52</u> | <u>MATLAB Command Window</u> |
| Distancia_recorrida = | | Distancia_recorrida = | |
| 58.505837681464008 | | 62.672548236224863 | |
| Energia_bat_descarga = | | Energia_bat_descarga = | |
| 8.721751941686470 | | 16.614114070515168 | |
| Energia_bat_carga = | | Energia_bat_carga = | |
| -4.580992841838980 | | -3.399952294786767 | |
| Energia_bat_neta = | | Energia_bat_neta = | |
| 4.140759099847490 | | 13.214161775728401 | |
| >> | | >> | |

**Anexo #4: Costo unitario por km de alimentador primario**

| RESUMEN DE COSTOS UNITARIOS DE OBRA POR KILOMETRO DE ALIMENTADOR PRIMARIO EN POSTES DE H*A* EN EL AREA DE CONCESION | | | | | | | | | | | |
|---|---------------------|-----------------|------------|------------|-------------|--------------|------------|------------|-------------------|------------|------------|
| DESCRIPCION | ESTUDIOS TOPOGRAFI. | DISEÑO Y DIBUJO | REPLANTEOS | MATERIALES | TRANSPORTES | MANO DE OBRA | FISCALIZA. | INVENTARIO | GASTOS ADMINISTR. | TOTAL US\$ | COSTO US\$ |
| TRIFASICO A 13.8 kV | 393.62 | 171.31 | 325.40 | 6,773.10 | 621.14 | 6,121.07 | 795.30 | 100.00 | 2,548.70 | 17,849.64 | 17,850.00 |
| TRIFASICO A 22 kV | 393.62 | 171.31 | 325.40 | 6,929.10 | 622.39 | 6,220.85 | 795.30 | 100.00 | 2,590.30 | 18,148.27 | 18,150.00 |
| VALOR PROMEDIO EN A/P | 393.60 | 171.30 | 325.40 | 6,851.10 | 621.80 | 6,171.00 | 795.30 | 100.00 | 2,569.50 | 17,999.00 | |

- NOTA: 1.- La cuadrilla considerada para los cálculos es de 5 personas (Jefe de cuadrilla, Liniero 3, Liniero 2, Liniero 1 y Chofer).
- 2.- Se supone que se construye dentro del área de concesión y a 20 km en la ciudad.
- 3.- El número de postes a transportarse son de 6 para los alimentadores primarios.
- 4.- Los materiales incluyen: postes de H.A de 12m - 500 kg, conductor de Al, cableado, desnudo, ACSR #2 AWG y seccionador fusible unipolar, tipo abierto, clase 27 kV, entre otros.
- 5.- Para el cálculo de la mano de obra de alimentadores primarios se considera además el 100 % del desplazamiento dentro del área de concesión.
- 6.- El replanteo incluye equipos como: tecler 1-1/2 toneladas, tirfor de 2 toneladas, camión grúa, juegos de trepadoras para poste circular, estación total, entre otros.
- 7.- Los estudios topográficos incluyen: costos de reconocimiento del terreno, definición de la ruta y memoria técnica, entre otros.

Anexo #5: Ficha técnica de la estación ABB Terra 54 CJG



PRODUCT LEAFLET

Smarter Mobility Terra 54 multi-standard DC charging station



Terra 54 is the successor of Terra 53, the best sold 50 kW DC charging station in Europe and North America. Supporting increasing EV battery capacities, Terra 54 enables continuous charging at full 50 kW at 150 – 500 V, while 150 – 920 V is supported by Terra 54HV.

Terra 54 supports CCS, CHAdeMO and AC functionality, and introduces ingenious new connector holders. It complies with all relevant international standards, including the EMC Class B norm, required for safe operation on residential, office, retail and petrol station locations. The new cabinet design provides improved ergonomics and serviceability. All chargers come with integrated Connected Services, allowing remote monitoring, diagnostics, statistics, and software upgrades.

Terra 54 is ideally suited for highway rest stops and petrol stations, as well as for retail and office locations, car dealerships, fleet applications, etc. Depending on the customer needs, it supports the industry standards based fast charging technology with a tailored combination of CCS and CHAdeMO, as well as AC charging. Besides the CE certified charger series, ABB also offers versions for North American (UL), China (GB), Australia (RCM), and the Russian Customs Union (EAC).

Terra 54 has the highest uptime due to redundancy on power and communication. All ABB chargers come with Internet based Connected Services to allow customers to easily connect their chargers to different software systems like back-offices, payment platforms or smart grid energy systems. This enables remote assistance, tailored diagnostic trouble shooting and repair, and remote updates and upgrades. A reliable, secure, cost efficient and future proof connectivity solution, based on open industry interfaces.

Main features

- 50 kW DC fast charger supporting CCS, CHAdeMO and Type 2 AC charging (optional)
- 22 or 43 kW AC cable, or 22 kW AC socket (optional)
- Designed to deliver full output power continuously, and reliably over lifetime
- IEC 61000 EMC Class B certified for industrial and residential areas (including petrol stations, retail outlets, offices, etc.)
- Future proof connection via open industry standards, including remote uptime monitoring and assistance, updates and upgrades
- Daylight readable touchscreen display
- Graphic visualization of charging progress
- RFID authorization
- Robust all weather stainless steel enclosure
- Quick and easy installation

Applications

- Highway petrol / service stations
- Metropolitan / urban areas
- Commercial fleet operators
- EV infrastructure operators and service providers

| Outlet specifications | C (default) | J (option) | G (option) | T (option) |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|
| Charging standard | CCS | CHAdeMO 2.0 | Type 2 cable | Type 2 socket |
| Maximum output power | 50 kW | 50 kW | 22 or 43 kW | 22 kW |
| Output voltage Terra 54 | 150 - 500 V _{DC} | 150 - 500 V _{DC} | 400 V +/- 10% | 400 V +/- 10% |
| Output voltage Terra 54HV | 150 - 920 V _{DC} | 150 - 500 V _{DC} | 400 V +/- 10% | 400 V +/- 10% |
| Maximum output current | 125 A _{DC} | 125 A _{DC} | 63 A | 32 A |
| Connector/ socket type | CCS2 / IEC 62196 Mode-4 | CHAdeMO 2.0 / JEVs G105 | IEC62196 Mode-3 Type-2 | IEC62196 Mode-3 Type 2 |
| Cable length | 3.9 m | 3.9 m | 3.9 m | - |

New features Terra 54

- Charging batteries at 150 – 500 V (Terra 54), or at 150 – 920 V (Terra 54HV)
- New ingenious connector holders, for easier handling and more stable holding
- Optional CCV or Nayax payment terminal, suited for an increasing number of countries
- Prepared for options like MID metering, integration with building management systems, cable management, etc.

Possible configurations

Terra 54 is available in the following configurations, all with CCS cable from left, and CHAdeMO cable (optional) from right side:

- Terra 54 CJG: CCS, CHAdeMO and (22 or) 43 kW AC connector
- Terra 54 CJT: CCS, CHAdeMO and 22 kW AC socket
- Terra 54 CJ: CCS and CHAdeMO
- Terra 54 CT: CCS and 22 kW AC socket

Further optional features

- Customized branding possibilities, including customizable user interface
- Parking bay occupancy detection
- PIN code authorization
- Site load management, for one or more chargers, to avoid expensive grid upgrades
- Web tools for statistics and access management
- Integration with back-offices, payment platforms and smart grid energy systems



Possible configurations (from left to right): Terra 54 CT, Terra 54 CJ, Terra 54 CJT, Terra 54 CJG with optional payment terminal (not shown, amongst other, Terra 54 CG, Terra 54 CJ UL, and Terra 63 GB for Chinese market).

| General specifications | |
|--|--|
| Charging sessions | 1 DC session 1 DC & 1 AC session (G & T models) |
| Efficiency | 94% at nominal output power |
| EMC emission | IEC 61000-6-3 Class B - Residential |
| EMC immunity | IEC 61000-6-2 Industrial |
| Environment of use | Indoor / outdoor |
| Protection rating | IP54, IK10 (cabinet), IK8 (screen) |
| Operating temperature | -35 °C to +55 °C (de-rating characteristics apply) |
| Dimensions (D x W x H) | 780 mm x 565 mm x 1900 mm |
| Mass | 350 kg |
| Grid Interface | |
| Input AC power connection | 3 Phases + Neutral + PE |
| Input voltage range | 400 VAC +/- 10% (50 Hz or 60 Hz) |
| Max. rated input current & power (@ 50 Hz) | C, CJ : 80 A, 55 kVA CT, CJT : 112 A, 77 kVA CJG, CG : 143 A, 98 kVA |
| Power factor (full load) | > 0.96 |
| THD in all operating points | < 4.5 % |
| Operating Noise level | < 60 dBA |
| User & Network Interfaces | |
| Screen | 7" touchscreen |
| RFID system | ISO/ IEC 14443A/ B, ISO/ IEC 15393 |
| Network connection | Cellular modem: GSM / 3G/ 4G LAN: 10/ 100 Base-T Ethernet |
| Communication protocol | Open Charger Point Protocol (OCPP) 1.6 (and previous versions) |
| Options | |
| Local payments | Credit Cards and NFC (including Apple Pay) reader |
| Power meter | DC & AC certified meters |
| Cable management | Charger prepared for CMS installation system |

For more information please contact:

ABB EV Infrastructure
 Heertjeslaan 6
 2629 JG, Delft
 The Netherlands
 Phone: +3188 4404610
 E-mail: info.evci@nl.abb.com

abb.com/ evcharging

**Anexo #6: Simulaciones de la ruta de estudio**

| <u>Ruta de ida</u> | Masa de 345 kg | Masa de 69 kg |
|------------------------------|----------------|---------------|
| Distancia (km) | 195.20 | 195.20 |
| Energía de descarga (kWh) | 41.42 | 36.44 |
| Energía de carga (kWh) | -19.20 | -16.52 |
| Energía neta consumida (kWh) | 22.22 | 19.92 |

| <u>Ruta de regreso</u> | Masa de 345 kg | Masa de 69 kg |
|------------------------------|----------------|---------------|
| Distancia (km) | 194.48 | 194.48 |
| Energía de descarga (kWh) | 54.81 | 48.39 |
| Energía de carga (kWh) | -12.64 | -10.81 |
| Energía neta consumida (kWh) | 42.17 | 37.58 |

Anexo #7: Presupuesto referencial de la instalación de una EVCS

| OBRAS CIVILES | | | | | |
|-----------------------------|---|--------|----------|-------------|--------------|
| Código | Descripción | Unidad | Cantidad | P.Unitario | P.Total |
| 501001 | Banco de ductos en acera con configuración 2x2 de 110 mm, EU0-0B2X2B2 | m | 25 | \$ 40.00 | \$ 1,000.00 |
| 501003 | Pozo para redes subterráneas tipo B | u | 2 | \$ 325.00 | \$ 650.00 |
| 501005 | Replanteo y nivelación | m2 | 60 | \$ 1.50 | \$ 90.00 |
| 501009 | Cámara de transformación a nivel | u | 1 | \$ 6,610.15 | \$ 6,610.15 |
| SUBTOTAL | | | | | \$ 8,350.15 |
| MATERIALES REDES ELECTRICAS | | | | | |
| Código | Descripción | Unidad | Cantidad | P.Unitario | P.Total |
| 203001 | Cond Aisl Cab de Pot, 2000V Cu TTU # 3/0 AWG | m | 25 | \$ 7.70 | \$ 192.50 |
| 203002 | Conductor de Cu.tipo DESNUDO calibre # 2 AWG | m | 45 | \$ 3.52 | \$ 158.40 |
| 203003 | Conductor desnudo cableado Al. ACSR # 2 | m | 3 | \$ 0.56 | \$ 1.68 |
| 203004 | Cond. Aisl. Cab de Pot, 600V Cu THHN # 8 AWG, 7 hilos | m | 5 | \$ 1.49 | \$ 7.45 |
| 203005 | Conductor de Cu.tipo DESNUDO calibre # 1/0 AWG | m | 45 | \$ 5.72 | \$ 257.40 |
| 203006 | Cond. Cab. de Cu tipo XLPE 25kV 90 C. # 2 AWG | m | 120 | \$ 8.80 | \$ 1,056.00 |
| 203007 | Conector de Al. Linea Energizada # 3/0 | U | 3 | \$ 9.19 | \$ 27.57 |
| 203008 | Conector terminal recto Cu/Al.# 1/0 AWG, NEMA 1 | U | 3 | \$ 2.70 | \$ 8.10 |
| 203009 | Conector de compresión tipo ojo hasta 3/0 AWG | U | 11 | \$ 16.50 | \$ 181.50 |
| 203010 | Conector Perno hendido, Cu-Al, 2/0 AWG | U | 5 | \$ 5.09 | \$ 25.45 |
| 203011 | Kit terminal unipolar, tipo exterior, para 25 kV, hasta 3/0 AWG. | U | 1 | \$ 270.00 | \$ 270.00 |
| 203012 | Pararrayos autoválvula, clase distribución 10kA-18kV. | U | 3 | \$ 59.40 | \$ 178.20 |
| 203013 | Seccionador fusible, abierto, 15/27KV-100A. | U | 3 | \$ 77.00 | \$ 231.00 |
| 203014 | Varilla copperweld de ø 5/8"x1.20m. con conector | U | 3 | \$ 6.03 | \$ 18.09 |
| 203015 | Suelda exotérmica | U | 5 | \$ 11.00 | \$ 55.00 |
| 203016 | Abrazadera simple sujeción, rango ø 6 1/2" - 7 1/2" | U | 2 | \$ 5.69 | \$ 11.38 |
| 203017 | Abraz. U de ø 5/8" x 24 cm, 2 tuer.-arandelas. | U | 2 | \$ 3.58 | \$ 7.16 |
| 203018 | Cruceta h.galv. longitud 2.40 m. | U | 2 | \$ 51.69 | \$ 103.38 |
| 203019 | Perfil L para PIE AMIGO de 38.1x38.1x6.35x700mm. | U | 4 | \$ 8.26 | \$ 33.04 |
| 203020 | Perno máquina cadmeado de ø 1/4" x 1". | U | 4 | \$ 0.66 | \$ 2.64 |
| 203021 | Reversible EMT, 4" de diámetro. | U | 1 | \$ 3.85 | \$ 3.85 |
| 203022 | Tubo EMT, 4" de diám. x 3 mts. de long. | U | 2 | \$ 38.13 | \$ 76.26 |
| 203023 | Unión EMT, 4" de diám. | U | 2 | \$ 6.50 | \$ 13.00 |
| 203024 | Codo EMT, 4" de diámetro. | U | 1 | \$ 23.52 | \$ 23.52 |
| 203025 | Cinta eriband | m | 5 | \$ 2.20 | \$ 11.00 |
| 203026 | Hebillas eriband | U | 5 | \$ 1.10 | \$ 5.50 |
| 203027 | Transformador Padmounted, Radial, 3F, 22kV/400-230V, 112.5 kVA | U | 1 | \$ 6,000.00 | \$ 6,000.00 |
| 203028 | Transformador de medición en medio voltaje (Trafomix) y accesorios | U | 1 | \$ 3,000.00 | \$ 3,000.00 |
| 203029 | Tablero de distribución en bajo voltaje | U | 1 | \$ 1,500.00 | \$ 1,500.00 |
| SUBTOTAL | | | | | \$ 13,459.07 |



| EQUIPOS ELECTRICOS | | | | | |
|---------------------------------|--|--------|----------|--------------|--------------|
| - | Estación de carga ABB Terra 54 CJG 50 kW | U | 1 | \$ 38,375.00 | \$ 38,375.00 |
| SUBTOTAL | | | | | \$ 38,375.00 |
| MANO DE OBRA CALIFICADA MONTAJE | | | | | |
| Código | Descripción | Unidad | Cantidad | P.Unitario | P.Total |
| 2009 | PUNTA TERMINAL EXTERIOR CABLE CALIBRE # 2 / 25 kV | U | 3 | \$ 46.25 | \$ 138.75 |
| 2058 | ARMADA DE BAJANTE EN EMT 110 mm DE RED AEREA A SUBT. M.T. | U | 1 | \$ 56.50 | \$ 56.50 |
| 2059 | ARMADO DE TABLERO DE MEDIDOR | U | 1 | \$ 77.48 | \$ 77.48 |
| 2076 | TENDIDO CONDUCT. XLPE 2 AWG 25 kV,3F M.T. EN DUCTO 110 mm | km | 0.12 | \$ 1,516.35 | \$ 181.96 |
| 2094 | TENDIDO CONDUCT. TTU 3/0 AWG, 3F EN DUCTO 110 mm | km | 0.025 | \$ 1,031.68 | \$ 25.79 |
| 2099 | TENDIDO CONDUCT. DE COBRE DESNUDO 1/0 AWG 1F EN DUCTO | km | 0.09 | \$ 226.47 | \$ 20.38 |
| 1802 | SECCIONADOR S3,3 PROTECTOR SOBRETENSION Y PUESTA TIERRA(SP3) | U | 1 | \$ 51.94 | \$ 51.94 |
| 2008 | MONTAJE E INST.ESTAC.TRANSF. 3F PADMOUNTED. 125 kVA | U | 1 | \$ 371.45 | \$ 371.45 |
| 0416 | ESTRUCTURA TIPO SC | U | 2 | \$ 26.16 | \$ 52.32 |
| 2095 | MONTAJE E INSTALACION DE TRAFOMIX | U | 1 | \$ 221.45 | \$ 221.45 |
| - | PRUEBAS DE AISLAMIENTO Y ENERGIZACION | U | 6 | \$ 25.00 | \$ 150.00 |
| SUBTOTAL | | | | | \$ 1,348.03 |
| TRANSPORTE | | | | | |
| Código | Descripción | Unidad | Cantidad | P.Unitario | P.Total |
| 5032 | CARGA-TRANSP.-DESCARGA MATERIALES | U | 1 | \$ 357.86 | \$ 357.86 |
| SUBTOTAL | | | | | \$ 357.86 |
| PRESUPUESTO REFERENCIAL | | | | | |
| Código | Descripción | Unidad | Cantidad | P.Unitario | P.Total |
| 501001 | OBRAS CIVILES | U | 1 | \$ 8,350.15 | \$ 8,350.15 |
| 501002 | MATERIALES REDES ELECTRICAS | U | 1 | \$ 13,459.07 | \$ 13,459.07 |
| - | EQUIPOS ELÉCTRICOS | U | 1 | \$ 38,375.00 | \$ 38,375.00 |
| 501004 | MANO DE OBRA CALIFICADA MONTAJE | U | 1 | \$ 1,348.03 | \$ 1,348.03 |
| 501005 | TRANSPORTE | U | 1 | \$ 357.86 | \$ 357.86 |
| SUBTOTAL | | | | | \$ 61,890.11 |
| INGENIERIA Y ADMINISTRACION | | | | | \$ 6,189.01 |
| IVA (12%) | | | | | \$ 8,169.49 |
| TOTAL | | | | | \$ 76,248.61 |

Nota: Se considera la acometida en medio voltaje desde un poste con red trifásica en medio voltaje existente.

Anexo #8: Ponderación del escenario 1

- Consumo de energía obtenido mediante el modelo matemático (Matlab®)

| <u>Ruta de ida</u> | Lab. Balzay → Puerto Inca | Puerto Inca → Aeropuerto |
|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Distancia (km) | 122.27 | 72.93 |
| Energía de descarga (kWh) | 24.42 | 16.99 |
| Energía de carga (kWh) | -14.40 | -4.79 |
| Energía neta consumida (kWh) | 10.02 | 12.20 |

| <u>Ruta de regreso</u> | Aeropuerto → Las Mercedes | Las Mercedes → Restaurante Montañaña Hierba Buena | Restaurante Montañaña Hierba Buena → Lab. Balzay |
|------------------------------|------------------------------|--|--|
| Distancia (km) | 75.57 | 46.65 | 72.25 |
| Energía de descarga (kWh) | 17.47 | 19.30 | 18.02 |
| Energía de carga (kWh) | -4.49 | -1.81 | -6.33 |
| Energía neta consumida (kWh) | 12.98 | 17.49 | 11.69 |



- **Ponderación de factores**

| <u>Ubicación de la EVCS – Las Mercedes (-2.55666139,-79.55380388)</u> | | | |
|--|-----|------------------|----------------------------------|
| Factores | | Sumatoria | % de viabilidad del sitio |
| Factor geográfico y de carretera (≥ 12 %) | | | |
| Distancia mínima | 1 | 3 | 24 % |
| Disponibilidad de terreno | 1 | | |
| Estado de la red vial | 1 | | |
| Factor ambiental (≥ 4 %) | | | |
| Áreas protegidas | 1 | 1 | 8 % |
| Factor eléctrico | | | |
| Disponibilidad de red eléctrica | 1 | 2 | 20 % |
| Calidad de energía | 1 | | |
| Factor económico | | | |
| Costo de construcción de la estación de carga | 0.5 | 0.5 | 8 % |
| Factor social | | | |
| Distancias mínimas de seguridad EVCS | 0 | 3 | 9 % |
| Servicio de alumbrado público | 1 | | |
| Zona poblada | 1 | | |
| Actividades comerciales | 1 | | |
| \sum Parcial sobre el 80 % | | | 69 % |

| <u>Ubicación de la EVCS – Montañita Hierba Buena (-2.71828210,-79.41751674)</u> | | | |
|--|-----|------------------|----------------------------------|
| Factores | | Sumatoria | % de viabilidad del sitio |
| Factor geográfico y de carretera (≥ 12 %) | | | |
| Distancia mínima | 0.5 | 2 | 16 % |
| Disponibilidad de terreno | 1 | | |
| Estado de la red vial | 0.5 | | |
| Factor ambiental (≥ 4 %) | | | |
| Áreas protegidas | 1 | 1 | 8 % |
| Factor eléctrico | | | |



| | | | |
|---|-----|-----|------|
| Disponibilidad de red eléctrica | 1 | 2 | 20 % |
| Calidad de energía | 1 | | |
| Factor económico | | | |
| Costo de construcción de la estación de carga | 0.5 | 0.5 | 8 % |
| Factor social | | | |
| Distancias mínimas de seguridad EVCS | 0.5 | 2 | 6 % |
| Servicio de alumbrado público | 1 | | |
| Zona poblada | 0 | | |
| Actividades comerciales | 0.5 | | |
| \sum Parcial sobre el 80 % | | | 58 % |

| Ubicación de la EVCS – Puerto Inca (-2.53711262,-79.55017423) | | | |
|--|-----|------------------|----------------------------------|
| Factores | | Sumatoria | % de viabilidad del sitio |
| Factor geográfico y de carretera (≥ 12 %) | | | |
| Distancia mínima | 1 | 24 | 24 % |
| Disponibilidad de terreno | 1 | | |
| Estado de la red vial | 1 | | |
| Factor ambiental (≥ 4 %) | | | |
| Áreas protegidas | 1 | 1 | 8 % |
| Factor eléctrico | | | |
| Disponibilidad de red eléctrica | 1 | 2 | 20 % |
| Calidad de energía | 1 | | |
| Factor económico | | | |
| Costo de construcción de la estación de carga | 0.5 | 0.5 | 8 % |
| Factor social | | | |
| Distancias mínimas de seguridad EVCS | 1 | 4 | 12 |
| Servicio de alumbrado público | 1 | | |
| Zona poblada | 1 | | |
| Actividades comerciales | 1 | | |
| \sum Parcial sobre el 80 % | | | 72 % |



| <u>Factor de simulación escenario 1</u> | | Ponderación | Sumatoria | % parcial de viabilidad del escenario |
|--|--|--------------------|------------------|--|
| Origen - EVCS | | | | |
| Cuenca - Guayaquil | Lab. Balzay → Puerto Inca | 0.9 | 1.6 | 8 % |
| Guayaquil - Cuenca | Aeropuerto → Las Mercedes | 0.7 | | |
| ENTRE EVCS | | | | |
| Cuenca - Guayaquil | Puerto Inca → Aeropuerto | 1 | 1.1 | 3.66 % |
| Guayaquil - Cuenca | Las Mercedes → Restaurante Montañita Hierba Buena | 0.1 | | |
| | Restaurante Montañita Hierba Buena → Lab. Balzay | 0 | | |
| \sum Parcial sobre el 20 % | | | | 11.66 % |

Anexo #9: Ponderación del escenario 2

- Consumo de energía obtenido mediante el modelo matemático (Matlab®)

| <u>Ruta de ida</u> | Lab. Balzay → Puerto Inca | Puerto Inca → Aeropuerto |
|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Distancia (km) | 122.29 | 72.91 |
| Energía de descarga (kWh) | 24.42 | 16.99 |
| Energía de carga (kWh) | -14.40 | -4.79 |
| Energía neta consumida (kWh) | 10.02 | 12.20 |

| <u>Ruta de regreso</u> | Aeropuerto → Puerto Inca | Puerto Inca → Vista Linda | Vista Linda → Lab. Balzay |
|-------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Distancia (km) | 72.91 | 48.18 | 73.38 |
| Energía de descarga (kWh) | 16.29 | 19.66 | 18.82 |
| Energía de carga (kWh) | -4.22 | -1.95 | -6.47 |
| Energía neta consumida (kWh) | 12.07 | 17.71 | 12.35 |

- Ponderación de factores

| <u>Ubicación de la EVCS – Vista Linda (-2.71072949,-79.42291785)</u> | | | |
|---|-----|------------------|----------------------------------|
| Factores | | Sumatoria | % de viabilidad del sitio |
| Factor geográfico y de carretera (≥ 12 %) | | | |
| Distancia mínima | 0.5 | 2 | 16 % |
| Disponibilidad de terreno | 1 | | |



| | | | |
|---|-----|-----|--------|
| Estado de la red vial | 0.5 | | |
| Factor ambiental ($\geq 4\%$) | | | |
| Áreas protegidas | 1 | 1 | 8 % |
| Factor eléctrico | | | |
| Disponibilidad de red eléctrica | 1 | 2 | 20 % |
| Calidad de energía | 1 | | |
| Factor económico | | | |
| Costo de construcción de la estación de carga | 0.5 | 0.5 | 8 % |
| Factor social | | | |
| Distancias mínimas de seguridad EVCS | 1 | 2.5 | 7.5 % |
| Servicio de alumbrado público | 1 | | |
| Zona poblada | 0 | | |
| Actividades comerciales | 0.5 | | |
| \sum Parcial sobre el 80 % | | | 59.5 % |

| <u>Factor de simulación del escenario 2</u> | | Ponderación | Sumatoria | % parcial de viabilidad del escenario |
|---|---------------------------|-------------|-----------|---------------------------------------|
| Origen - EVCS | | | | |
| Cuenca - Guayaquil | Lab. Balzay → Puerto Inca | 0.9 | 1.7 | 8.5 % |
| Guayaquil - Cuenca | Aeropuerto → Puerto Inca | 0.8 | | |
| ENTRE EVCS | | | | |
| Cuenca - Guayaquil | Puerto Inca → Aeropuerto | 1 | 2.1 | 7 % |
| Guayaquil - Cuenca | Puerto Inca → Vista Linda | 0.1 | | |
| | Vista Linda → Lab. Balzay | 1 | | |
| \sum Parcial sobre el 20 % | | | | 15.5 % |

Anexo #10: Ponderación del escenario 3

- Consumo de energía obtenido mediante el modelo matemático (Matlab®)

| <u>Ruta de ida</u> | Lab. Balzay → La Palma (7.1 km después de Virgen de Fátima) | La Palma → Aeropuerto |
|--------------------|---|-----------------------|
| Distancia (km) | 166.50 | 28.70 |



| | | |
|------------------------------|--------|-------|
| Energía de descarga (kWh) | 31.95 | 9.46 |
| Energía de carga (kWh) | -16.00 | -3.18 |
| Energía neta consumida (kWh) | 15.95 | 6.28 |

| <u>Ruta de regreso</u> | Aeropuerto → Tamarindo 2 (1.2 km antes de la estación de servicio de Tamarindo) | Tamarindo 2 → Restaurante Molleturo | Restaurante Molleturo → Lab. Balzay |
|------------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Distancia (km) | 86.16 | 45.96 | 62.35 |
| Energía de descarga (kWh) | 19.54 | 19.91 | 15.34 |
| Energía de carga (kWh) | -4.89 | -2.16 | -5.57 |
| Energía neta consumida (kWh) | 14.65 | 17.75 | 9.77 |

▪ **Ponderación de factores**

| Ubicación de la EVCS – La Palma (-2.21911841,-79.69428631) | | | |
|---|-----|------------------|----------------------------------|
| Factores | | Sumatoria | % de viabilidad del sitio |
| Factor geográfico y de carretera (≥ 12 %) | | | |
| Distancia mínima | 1 | 3 | 24 % |
| Disponibilidad de terreno | 1 | | |
| Estado de la red vial | 1 | | |
| Factor ambiental (≥ 4 %) | | | |
| Áreas protegidas | 1 | 1 | 8 % |
| Factor eléctrico | | | |
| Disponibilidad de red eléctrica | 1 | 2 | 20 % |
| Calidad de energía | 1 | | |
| Factor económico | | | |
| Costo de construcción de la estación de carga | 0.5 | 0.5 | 8 % |
| Factor social | | | |
| Distancias mínimas de seguridad EVCS | 1 | 3 | 9 % |
| Servicio de alumbrado público | 1 | | |
| Zona poblada | 0.5 | | |
| Actividades comerciales | 0.5 | | |



| | |
|------------------------------|------|
| \sum Parcial sobre el 80 % | 69 % |
|------------------------------|------|

| Ubicación de la EVCS – Tamarindo 2 (-2.60404628,-79.47521829) | | | |
|--|-----|-----------|---------------------------|
| Factores | | Sumatoria | % de viabilidad del sitio |
| Factor geográfico y de carretera (≥ 12 %) | | | |
| Distancia mínima | 1 | 3 | 24 % |
| Disponibilidad de terreno | 1 | | |
| Estado de la red vial | 1 | | |
| Factor ambiental (≥ 4 %) | | | |
| Áreas protegidas | 1 | 1 | 8 % |
| Factor eléctrico | | | |
| Disponibilidad de red eléctrica | 1 | 2 | 20 % |
| Calidad de energía | 1 | | |
| Factor económico | | | |
| Costo de construcción de la estación de carga | 0.5 | 0.5 | 8 % |
| Factor social | | | |
| Distancias mínimas de seguridad EVCS | 1 | 3 | 9 % |
| Servicio de alumbrado público | 1 | | |
| Zona poblada | 0.5 | | |
| Actividades comerciales | 0.5 | | |
| \sum Parcial sobre el 80 % | | | 69 % |

| Ubicación de la EVCS – Molleturo (-2.776176394,-79.39528177) | | | |
|---|-----|-----------|---------------------------|
| Factores | | Sumatoria | % de viabilidad del sitio |
| Factor geográfico y de carretera (≥ 12 %) | | | |
| Distancia mínima | 0.5 | 2 | 16 % |
| Disponibilidad de terreno | 1 | | |
| Estado de la red vial | 0.5 | | |
| Factor ambiental (≥ 4 %) | | | |
| Áreas protegidas | 1 | 1 | 8 % |



| Factor eléctrico | | | |
|---|-----|-----|------|
| Disponibilidad de red eléctrica | 1 | 2 | 20 % |
| Calidad de energía | 1 | | |
| Factor económico | | | |
| Costo de construcción de la estación de carga | 0.5 | 0.5 | 8 % |
| Factor social | | | |
| Distancias mínimas de seguridad EVCS | 0 | 2 | 6 % |
| Servicio de alumbrado público | 1 | | |
| Zona poblada | 0.5 | | |
| Actividades comerciales | 0.5 | | |
| \sum Parcial sobre el 80 % | | | 58 % |

| <u>Factor de simulación del escenario 3</u> | | Ponderación | Sumatoria | % parcial de viabilidad del escenario |
|---|-------------------------------------|-------------|-----------|---------------------------------------|
| Origen - EVCS | | | | |
| Cuenca - Guayaquil | Lab. Balzay → La Palma | 0.4 | 0.8 | 4 % |
| Guayaquil - Cuenca | Aeropuerto → Tamarindo 2 | 0.4 | | |
| ENTRE EVCS | | | | |
| Cuenca - Guayaquil | La Palma → Aeropuerto | 0 | 0.1 | 0.33 % |
| Guayaquil - Cuenca | Tamarindo 2 → Restaurante Molleturo | 0.1 | | |
| | Restaurante Molleturo → Lab. Balzay | 0 | | |
| \sum Parcial sobre el 20 % | | | | 4.33 % |

Anexo #11: Ponderación del escenario 4

- Consumo de energía obtenido mediante el modelo matemático (Matlab®)

| <u>Ruta de ida</u> | Lab. Balzay → La Palma | La Palma → Aeropuerto |
|---------------------------|------------------------|-----------------------|
| Distancia (km) | 166.50 | 28.70 |
| Energía de descarga (kWh) | 31.95 | 9.46 |
| Energía de carga (kWh) | -16.00 | -3.18 |



| | | |
|------------------------------|-------|------|
| Energía neta consumida (kWh) | 15.95 | 6.28 |
|------------------------------|-------|------|

| <i>Ruta de regreso</i> | Aeropuerto → Tamarindo | Tamarindo → Sector San Pedro de Yumate | Sector San Pedro de Yumate → Lab. Balzay |
|-------------------------------|-------------------------------|---|---|
| Distancia (km) | 87.36 | 41.20 | 65.92 |
| Energía de descarga (kWh) | 19.99 | 19.13 | 15.67 |
| Energía de carga (kWh) | -4.91 | -1.70 | -6.03 |
| Energía neta consumida (kWh) | 15.08 | 17.43 | 9.63 |

▪ **Ponderación de factores**

| <i>Ubicación de la EVCS – Tamarindo (-2.61360745,-79.47071325)</i> | | | |
|---|-----|------------------|----------------------------------|
| Factores | | Sumatoria | % de viabilidad del sitio |
| Factor geográfico y de carretera (≥ 12 %) | | | |
| Distancia mínima | 1 | 3 | 24 % |
| Disponibilidad de terreno | 1 | | |
| Estado de la red vial | 1 | | |
| Factor ambiental (≥ 4 %) | | | |
| Áreas protegidas | 1 | 1 | 8 % |
| Factor eléctrico | | | |
| Disponibilidad de red eléctrica | 1 | 2 | 20 % |
| Calidad de energía | 1 | | |
| Factor económico | | | |
| Costo de construcción de la estación de carga | 0.5 | 0.5 | 8 % |
| Factor social | | | |
| Distancias mínimas de seguridad EVCS | 1 | 3.5 | 10.5 % |
| Servicio de alumbrado público | 1 | | |
| Zona poblada | 0.5 | | |
| Actividades comerciales | 1 | | |
| \sum Parcial sobre el 80 % | | | 70.5 % |

| <i>Ubicación de la EVCS – San Pedro de Yumate (-2.75559783,-79.40311473)</i> | | | |
|---|-----|------------------|----------------------------------|
| Factores | | Sumatoria | % de viabilidad del sitio |
| Factor geográfico y de carretera (≥ 12 %) | | | |
| Distancia mínima | 0.5 | 2 | 16 % |
| Disponibilidad de terreno | 1 | | |



| | | | |
|---|-----|-----|--------|
| Estado de la red vial | 0.5 | | |
| Factor ambiental ($\geq 4\%$) | | | |
| Áreas protegidas | 1 | 1 | 8 % |
| Factor eléctrico | | | |
| Disponibilidad de red eléctrica | 1 | 2 | 20 % |
| Calidad de energía | 1 | | |
| Factor económico | | | |
| Costo de construcción de la estación de carga | 0.5 | 0.5 | 8 % |
| Factor social | | | |
| Distancias mínimas de seguridad EVCS | 1 | 3.5 | 10.5 % |
| Servicio de alumbrado público | 1 | | |
| Zona poblada | 0.5 | | |
| Actividades comerciales | 1 | | |
| \sum Parcial sobre el 80% | | | 62.5 |

| <u>Factor de simulación del escenario 4</u> | | Ponderación | Sumatoria | % parcial de viabilidad del escenario |
|--|--|--------------------|------------------|--|
| Origen - EVCS | | | | |
| Cuenca - Guayaquil | Lab. Balzay → La Palma | 0.4 | 0.8 | 4 % |
| Guayaquil - Cuenca | Aeropuerto → Tamarindo | 0.4 | | |
| ENTRE EVCS | | | | |
| Cuenca - Guayaquil | La Palma → Aeropuerto | 0 | 0.1 | 0.33 % |
| Guayaquil - Cuenca | Tamarindo → Sector San Pedro de Yumate | 0.1 | | |
| | Sector San Pedro de Yumate → Lab. Balzay | 0 | | |
| \sum Parcial sobre el 20 % | | | | 4.33 % |

Anexo #12: Ponderación del escenario 5

- Consumo de energía obtenido mediante el modelo matemático (Matlab®)

| | |
|---------------------------|--------------------------|
| <u>Ruta de ida</u> | Lab. Balzay → Aeropuerto |
| Distancia (km) | 195.21 |



| | |
|------------------------------|--------|
| Energía de descarga (kWh) | 41.38 |
| Energía de carga (kWh) | -19.20 |
| Energía neta consumida (kWh) | 22.18 |

| <u>Ruta de regreso</u> | Aeropuerto → Tamarindo | Tamarindo → Mirador "Vista Linda" | Mirador "Vista Linda" → Lab. Balzay |
|------------------------------|------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Distancia (km) | 87.36 | 33.74 | 73.38 |
| Energía de descarga (kWh) | 19.99 | 15.96 | 18.82 |
| Energía de carga (kWh) | -4.91 | -1.26 | -6.47 |
| Energía neta consumida (kWh) | 15.08 | 14.70 | 12.35 |

▪ Ponderación de factores

| <u>Factor de simulación del escenario 5</u> | | Ponderación | Sumatoria | % parcial de viabilidad del escenario |
|---|-------------------------------------|-------------|-----------|---------------------------------------|
| Origen - EVCS | | | | |
| Cuenca - Guayaquil | EVCS Cuenca – EVCS Guayaquil | 0.1 | 0.5 | 2.5 % |
| Guayaquil - Cuenca | Aeropuerto → Tamarindo | 0.4 | | |
| ENTRE EVCS | | | | |
| Cuenca - Guayaquil | EVCS Cuenca – EVCS Guayaquil | 0 | 1.8 | 6 % |
| Guayaquil - Cuenca | Tamarindo → Mirador "Vista Linda" | 0.8 | | |
| | Mirador "Vista Linda" → Lab. Balzay | 1 | | |
| \sum Parcial sobre el 20 % | | | | 8.5 % |

Anexo #13: Ponderación del escenario 6

▪ Consumo de energía obtenido mediante el modelo matemático (Matlab®)

| <u>Ruta de ida</u> | Lab. Balzay → Aeropuerto |
|------------------------------|--------------------------|
| Distancia (km) | 195.21 |
| Energía de descarga (kWh) | 41.38 |
| Energía de carga (kWh) | -19.20 |
| Energía neta consumida (kWh) | 22.18 |

| <u>Ruta de regreso</u> | Aeropuerto → Tamarindo | Tamarindo → Sector San Pedro de Yumate | Sector San Pedro de Yumate → Lab. Balzay |
|------------------------------|------------------------|--|--|
| Distancia (km) | 87.36 | 41.20 | 65.92 |
| Energía de descarga (kWh) | 19.99 | 19.13 | 15.67 |
| Energía de carga (kWh) | -4.91 | -1.70 | -6.03 |
| Energía neta consumida (kWh) | 15.08 | 17.43 | 9.63 |

▪ **Ponderación de factores**

| <u>Factor de simulación del escenario 6</u> | | Ponderación | Sumatoria | % parcial de viabilidad del escenario |
|---|--|-------------|-----------|---------------------------------------|
| Origen - EVCS | | | | |
| Cuenca - Guayaquil | EVCS Cuenca – EVCS Guayaquil | 0.1 | 0.5 | 2.5 % |
| Guayaquil - Cuenca | Aeropuerto → Tamarindo | 0.4 | | |
| ENTRE EVCS | | | | |
| Cuenca - Guayaquil | EVCS Cuenca – EVCS Guayaquil | 0 | 0.1 | 0.33 % |
| Guayaquil - Cuenca | Tamarindo → Sector San Pedro de Yumate | 0.1 | | |
| | Sector San Pedro de Yumate → Lab. Balzay | 0 | | |
| \sum Parcial sobre el 20 % | | | | 2.83 % |

Anexo #14: Ponderación del escenario 7

▪ **Consumo de energía obtenido mediante el modelo matemático (Matlab®)**

| <u>Ruta de ida</u> | Lab. Balzay → Aeropuerto |
|------------------------------|--------------------------|
| Distancia (km) | 195.21 |
| Energía de descarga (kWh) | 41.38 |
| Energía de carga (kWh) | -19.20 |
| Energía neta consumida (kWh) | 22.18 |

| <u>Ruta de regreso</u> | Aeropuerto → Puerto Inca | Puerto Inca → Mirador “Vista Linda” | Mirador “Vista Linda” → Lab. Balzay |
|------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Distancia (km) | 72.91 | 48.18 | 73.38 |
| Energía de descarga (kWh) | 16.29 | 19.66 | 18.82 |
| Energía de carga (kWh) | -4.22 | -1.95 | -6.47 |
| Energía neta consumida (kWh) | 12.07 | 17.71 | 12.35 |



- **Ponderación de factores**

| <u>Factor de simulación del escenario 7</u> | | Ponderación | Sumatoria | % parcial de viabilidad del escenario |
|--|--|--------------------|------------------|--|
| Origen - EVCS | | | | |
| Cuenca - Guayaquil | EVCS Cuenca – EVCS Guayaquil | 0.1 | 0.9 | 4.5 % |
| Guayaquil - Cuenca | Aeropuerto → Puerto Inca | 0.8 | | |
| ENTRE EVCS | | | | |
| Cuenca - Guayaquil | EVCS Cuenca – EVCS Guayaquil | 0 | 1.1 | 3.66 % |
| Guayaquil - Cuenca | Puerto Inca → Mirador “Vista Linda” | 0.1 | | |
| | Mirador “Vista Linda” → Lab. Balzay | 1 | | |
| \sum Parcial sobre el 20 % | | | | 8.16 % |

Anexo #15: Ponderación del escenario 8

- **Consumo de energía obtenido mediante el modelo matemático (Matlab®)**

| <u>Ruta de ida</u> | Lab. Balzay → Virgen del Cajas | Virgen del Cajas → Aeropuerto |
|-------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Distancia (km) | 23.90 | 171.30 |
| Energía de descarga (kWh) | 8.45 | 32.96 |
| Energía de carga (kWh) | -0.35 | -18.84 |
| Energía neta consumida (kWh) | 8.1 | 14.11 |

| <u>Ruta de regreso</u> | Aeropuerto → Puerto Inca | Puerto Inca → Vista Linda | Vista Linda → Lab. Balzay |
|-------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Distancia (km) | 72.91 | 48.18 | 73.38 |
| Energía de descarga (kWh) | 16.29 | 19.66 | 18.82 |
| Energía de carga (kWh) | -4.22 | -1.95 | -6.47 |
| Energía neta consumida (kWh) | 12.07 | 17.71 | 12.35 |

- **Ponderación de factores**

| <u>Factor de simulación del escenario 8</u> | | Ponderación | Sumatoria | % parcial de viabilidad del escenario |
|--|---------------------------------------|--------------------|------------------|--|
| Origen - EVCS | | | | |
| Cuenca - Guayaquil | Lab. Balzay → Virgen del Cajas | 1 | 1.8 | 9 % |
| Guayaquil - Cuenca | Aeropuerto → Puerto Inca | 0.8 | | |



| ENTRE EVCS | | | | |
|------------------------------|-------------------------------|-----|-----|---------|
| Cuenca - Guayaquil | Virgen del Cajas → Aeropuerto | 0.8 | 1.9 | 6.33 % |
| Guayaquil - Cuenca | Puerto Inca → Vista Linda | 0.1 | | |
| | Vista Linda → Lab. Balzay | 1 | | |
| \sum Parcial sobre el 20 % | | | | 15.33 % |

Anexo #16: Ponderación del escenario 9

- Consumo de energía obtenido mediante el modelo matemático (Matlab®)

| <u>Ruta de ida</u> | Lab. Balzay → Control Quinuas (El Cajas) | Control Quinuas → Aeropuerto |
|------------------------------|--|------------------------------|
| Distancia (km) | 24.65 | 170.55 |
| Energía de descarga (kWh) | 8.74 | 32.66 |
| Energía de carga (kWh) | -0.36 | -18.83 |
| Energía neta consumida (kWh) | 8.38 | 13.83 |

| <u>Ruta de regreso</u> | Aeropuerto → Puerto Inca | Puerto Inca → Vista Linda | Vista Linda → Lab. Balzay |
|------------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Distancia (km) | 72.91 | 48.18 | 73.38 |
| Energía de descarga (kWh) | 16.29 | 19.66 | 18.82 |
| Energía de carga (kWh) | -4.22 | -1.95 | -6.47 |
| Energía neta consumida (kWh) | 12.07 | 17.71 | 12.35 |

- Ponderación de factores

| <u>Factor de simulación del escenario 9</u> | | Ponderación | Sumatoria | % parcial de viabilidad del escenario |
|---|-------------------------------|-------------|-----------|---------------------------------------|
| Origen - EVCS | | | | |
| Cuenca - Guayaquil | Lab. Balzay → Control Quinuas | 1 | 1.8 | 9 % |
| Guayaquil - Cuenca | Aeropuerto → Puerto Inca | 0.8 | | |
| ENTRE EVCS | | | | |
| Cuenca - Guayaquil | Control Quinuas → Aeropuerto | 0.8 | 1.9 | 6.33 % |
| Guayaquil - Cuenca | Puerto Inca → Vista Linda | 0.1 | | |
| | Vista Linda → Lab. Balzay | 1 | | |
| \sum Parcial sobre el 20 % | | | | 15.33 % |

Anexo #17: Ponderación del escenario 10

- Consumo de energía obtenido mediante el modelo matemático (Matlab®)

| <u>Ruta de ida</u> | Lab. Balzay → Virgen del Cajas | Virgen del Cajas → Aeropuerto |
|------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Distancia (km) | 23.90 | 171.30 |
| Energía de descarga (kWh) | 8.45 | 32.96 |
| Energía de carga (kWh) | -0.35 | -18.84 |
| Energía neta consumida (kWh) | 8.1 | 14.11 |

| <u>Ruta de regreso</u> | Aeropuerto → Cerritos | Cerritos → Tamarindo | Tamarindo → Vista Linda | Vista Linda → Lab. Balzay |
|------------------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Distancia (km) | 51.80 | 35.55 | 33.74 | 73.38 |
| Energía de descarga (kWh) | 11.11 | 8.86 | 15.96 | 18.82 |
| Energía de carga (kWh) | -3.01 | -1.89 | -1.26 | -6.47 |
| Energía neta consumida (kWh) | 8.1 | 6.97 | 14.70 | 12.35 |

- Ponderación de factores

| <u>Factor de simulación del escenario 10</u> | | Ponderación | Sumatoria | % parcial de viabilidad del escenario |
|--|-----------------------------------|-------------|-----------|---|
| Origen - EVCS | | | | |
| Cuenca - Guayaquil | Lab. Balzay → Virgen del Cajas | 1 | 2 | 10 % |
| Guayaquil - Cuenca | Aeropuerto → Cerritos | 1 | | |
| ENTRE EVCS | | | | |
| Cuenca - Guayaquil | Virgen del Cajas → Aeropuerto | 0.8 | 2.6 | 6.5 % |
| Guayaquil - Cuenca | Cerritos → Tamarindo | 0 | | |
| | Tamarindo → Vista Linda | 0.8 | | |
| | Vista Linda → Lab. Balzay | 1 | | |
| \sum Parcial sobre el 20 % | | | | 16.5 % |

Anexo #18: Ponderación del escenario 11

- Consumo de energía obtenido mediante el modelo matemático (Matlab®)

| <u>Ruta de ida</u> | Lab. Balzay → Virgen del Cajas | Virgen del Cajas → Aeropuerto |
|------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Distancia (km) | 23.90 | 171.30 |
| Energía de descarga (kWh) | 8.45 | 32.96 |
| Energía de carga (kWh) | -0.35 | -18.84 |
| Energía neta consumida (kWh) | 8.1 | 14.11 |

| <u>Ruta de regreso</u> | Aeropuerto → Cerritos | Cerritos → Puerto Inca | Puerto Inca → Vista Linda | Vista Linda → Lab. Balzay |
|------------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Distancia (km) | 51.80 | 21.11 | 48.18 | 73.38 |
| Energía de descarga (kWh) | 11.11 | 5.16 | 19.66 | 18.82 |
| Energía de carga (kWh) | -3.01 | -1.20 | -1.95 | -6.47 |
| Energía neta consumida (kWh) | 8.1 | 3.96 | 17.71 | 12.35 |

- Ponderación de factores

| <u>Factor de simulación del escenario 11</u> | | Ponderación | Sumatoria | % parcial de viabilidad del escenario |
|--|-----------------------------------|-------------|-----------|---|
| Origen - EVCS | | | | |
| Cuenca - Guayaquil | Lab. Balzay → Virgen del Cajas | 1 | 2 | 10 % |
| Guayaquil - Cuenca | Aeropuerto → Cerritos | 1 | | |
| ENTRE EVCS | | | | |
| Cuenca - Guayaquil | Virgen del Cajas → Aeropuerto | 0.8 | 1.9 | 4.75 % |
| Guayaquil - Cuenca | Cerritos → Puerto Inca | 0 | | |
| | Puerto Inca → Vista Linda | 0.1 | | |
| | Vista Linda → Lab. Balzay | 1 | | |
| \sum Parcial sobre el 20 % | | | | 14.75 % |

Anexo #19. Simulaciones realizadas con una masa de 69 kg▪ **Escenario 2**

| <u>Ruta de ida</u> | Lab. Balzay → Puerto Inca | Puerto Inca → Aeropuerto |
|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Distancia (km) | 122.29 | 72.91 |
| Energía de descarga (kWh) | 21.18 | 15.26 |
| Energía de carga (kWh) | -12.35 | -4.16 |
| Energía neta consumida (kWh) | 8.83 | 11.10 |

| <u>Ruta de regreso</u> | Aeropuerto → Puerto Inca | Puerto Inca → Vista Linda | Vista Linda → Lab. Balzay |
|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Distancia (km) | 72.91 | 48.18 | 73.38 |
| Energía de descarga (kWh) | 14.72 | 17.34 | 16.30 |
| Energía de carga (kWh) | -3.64 | -1.69 | -5.48 |
| Energía neta consumida (kWh) | 11.08 | 15.65 | 10.82 |

▪ **Escenario 8**

| <u>Ruta de ida</u> | Lab. Balzay → Virgen del Cajas | Virgen del Cajas → Aeropuerto |
|------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Distancia (km) | 23.90 | 171.30 |
| Energía de descarga (kWh) | 7.25 | 29.18 |
| Energía de carga (kWh) | -0.30 | -16.22 |
| Energía neta consumida (kWh) | 6.95 | 12.96 |

| <u>Ruta de regreso</u> | Aeropuerto → Puerto Inca | Puerto Inca → Vista Linda | Vista Linda → Lab. Balzay |
|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Distancia (km) | 72.91 | 48.18 | 73.38 |
| Energía de descarga (kWh) | 14.72 | 17.34 | 16.30 |
| Energía de carga (kWh) | -3.64 | -1.69 | -5.48 |
| Energía neta consumida (kWh) | 11.08 | 15.65 | 10.82 |

▪ **Escenario 10**

| <u>Ruta de ida</u> | Lab. Balzay → Virgen del Cajas | Virgen del Cajas → Aeropuerto |
|------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| Distancia (km) | 23.90 | 171.30 |
| Energía de descarga (kWh) | 7.25 | 29.18 |
| Energía de carga (kWh) | -0.30 | -16.22 |
| Energía neta consumida (kWh) | 6.95 | 12.96 |



| <u>Ruta de regreso</u> | Aeropuerto → Cerritos | Cerritos → Tamarindo | Tamarindo → Vista Linda | Vista Linda → Lab. Balzay |
|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|--|
| Distancia (km) | 51.80 | 35.55 | 33.74 | 73.38 |
| Energía de descarga (kWh) | 10.07 | 7.94 | 14.04 | 16.30 |
| Energía de carga (kWh) | -2.63 | -1.58 | -1.11 | -5.48 |
| Energía neta consumida (kWh) | 7.44 | 6.35 | 12.93 | 10.82 |

Anexo #20: Ficha técnica de la estación PNE Solution 50 kW

| | Item | Specifications | Observation | |
|---------------------|-------------------------|---|---|-----------------|
| General | Size(mm) | 700mm*700mm*1600mm (W*D*H) | | |
| | Weight | 400kg | | |
| | Display | High brightness 7" LCD Display, Touch Screen | | |
| Electric | Input | 3Ø 4wire AC 380V(60Hz), Max. 56KVA (Voltage tolerance: -10 ~ +10%) | High frequency Transformer structure | |
| | Input I THD | <5% | | |
| | Output | SGS | DC50 ~ DC450 Max. 450VDC, 110A, 50kW | |
| | | CHAdEMO | DC50 ~ DC500 Max. 500VDC, 125A, 50kW | |
| | | COMBO | DC50 ~ DC500 Max. 500VDC, 125A, 50kW | Power De-rating |
| | | AC rapid | AC 380V(60Hz) Max. 63A, 43kW | |
| | Power Factor | >0.95 | | |
| | Charging Mode | CC, CV | | |
| | Voltage Accuracy | ±2.0%(Full Scale) | | |
| | Current Accuracy | ±2.0%(Full Scale) | | |
| | Max. Efficiency | >90% | | |
| Isolation Impedance | 5M @500V | Output terminal | | |
| Environment | Operating Temp | -20°C~50°C | | |
| | Humidity | <RH95%(Non-condensing) | | |
| | Environment | IP44 | | |
| Safety | Over Voltage | Automatically Stop | | |
| | Over Current | Automatically Stop | | |
| | Short-Circuit | Automatically Stop | | |
| | Over Temperature | Automatically Stop | | |
| | Ground Fault Detect | Automatically Stop | | |
| | Flooding Sensor | Automatically Stop | | |
| Etc. | Communication (Vehicle) | CAN 2.0B | SGS & CHAdEMO | |
| | | SAE J1772 | Control Pilot | |
| | | ISO/IEC15118, DIN70121 | Control Pilot | |
| | Communication (Server) | LAN(TCP/IP) | | |
| | Communication (AMI) | RS485(Modbus) | | |
| | Communication (RFPAD) | RS-232C | | |
| | Manual Button | Start, Stop, Emergency Stop | | |
| Payment system | RFID | | | |