



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Maestría en Electricidad Mención Redes Eléctricas Inteligentes

Estudio de factibilidad técnica de un sistema integral de transporte público eléctrico. Caso de estudio: Integración de electrolinerías a la infraestructura eléctrica del Tranvía de Cuenca.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magister en Electricidad, Mención Redes Eléctricas Inteligentes

Autor:

Eddy Gabriel Bravo Padilla

CI: 0103975397

Correo Electrónico: eddybravop@gmail.com

Tutor:

Luis Gerardo González Morales, Ph.D

CI: 1729711059

Cuenca, Ecuador

03-06-2020



Resumen

El Estado ecuatoriano en su afán de cambiar la matriz energética en el sector transporte, aprobó la Ley Orgánica de Eficiencia Energética, que establece el marco regulatorio para el uso obligatorio de transporte público urbano de tracción eléctrica a partir del año 2025. Pensando en una transición hacia la movilidad eléctrica, la ciudad de Cuenca contará pronto con un sistema de transporte masivo de tipo tranvía, que pretende ser un medio de transporte eléctrico eficiente y ecológico. El principal problema hacia esta transición es la falta de infraestructura de carga para las unidades de tracción eléctrica. El sistema tranviario se podría potenciar aprovechando su infraestructura para colocar estaciones de carga a lo largo de la ruta, ya que la ciudad no cuenta aún con este tipo de instalaciones de recarga. Esta tesis plantea la factibilidad técnica de incorporar electrolineras a la infraestructura eléctrica del tranvía, y proponer la integración mediante una infraestructura común de alimentación de distintos medios de transporte de tracción eléctrica, que en la actualidad ha sido diseñado únicamente para el tranvía. Para ello, se implementa y simula la red eléctrica del tranvía en distintos escenarios operativos, incorporando estaciones de carga a su infraestructura, y observar el impacto que generan en la red. Es factible técnicamente incorporar casi todos los escenarios, sin embargo, el que considera la carga rápida de 95 EV y 18 BEB es el más idóneo técnicamente de implementar. Para justificar la transición hacia la movilidad eléctrica se realiza un estudio energético, de cual se determina que un EV presenta un menor consumo energético y una mayor eficiencia en un 944%, en comparación a un taxi. Los autobuses de combustión presentan un mayor consumo energético en un 361% y una eficiencia energética menor en un 312% con respecto a los BEB. El tranvía presenta un consumo energético mayor en un 36%, una menor eficiencia en un 9% y un consumo energético por pasajero mayor en un 1374% en la ruta tranviaria. Desde el punto de vista energético, resulta una solución más rentable la operación comercial de una flota de BEB en reemplazo de las unidades de combustión actuales y del tranvía.

Palabras clave: EV, BEB, tranvía, eficiencia energética, consumo energético, estaciones de carga, impacto en redes eléctricas.



Abstract

The Ecuadorian State in its eagerness to change the energy matrix in the transport sector, approved the Organic Law of Energy Efficiency, which establishes the regulatory framework for the compulsory use of electric traction urban public transport from the year 2025. Thinking of a transition towards electric mobility, the city of Cuenca will soon have a tram-type mass transportation system, which aims to be an efficient and ecological means of electric transportation. The main problem towards this transition is the lack of charging infrastructure for the electric traction units. The tram system could be enhanced by taking advantage of its infrastructure to place charging stations along the route, since the city does not yet have this type of recharging facilities. This thesis raises the technical feasibility of incorporating charging stations to the electrical infrastructure of the tram, and to propose the integration by means of a common infrastructure for supplying different means of transport for electric traction, which at present has been designed solely for the tram. To do this, the tram's electrical network is implemented and simulated in different operating scenarios, incorporating charging stations into its infrastructure, and observing the impact they generate on the network. It is technically feasible to incorporate almost all the scenarios, however, the one that considers the fast charge of 95 EV and 18 BEB is the most technically ideal to implement. To justify the transition to electric mobility, an energy study is carried out, which determines that an EV has a lower energy consumption and a greater efficiency of 944%, compared to a taxi. Combustion buses have a higher energy consumption by 361% and a lower energy efficiency by 312% compared to BEBs. The tram presents a 36% higher energy consumption, a 9% lower efficiency and a 1374% higher energy consumption per passenger on the tram route. From an energy point of view, the commercial operation of a BEB fleet in replacement of the current combustion units and the tram is a more profitable solution.

Keywords: EV, BEB, tram, energy efficiency, energy consumption, charging stations, impact on electrical networks.



Tabla de contenidos

Resumen.....	i
Abstract.....	ii
Dedicatoria.....	xiii
Agradecimientos.....	xiv
1. Introducción.....	2
1.1. Problemática.....	6
1.2. Justificación.....	7
1.3. Alcance.....	7
1.4. Objetivos.....	8
2. Estado del Arte: Movilidad Eléctrica.....	10
2.2. El vehículo y autobús eléctrico a baterías.....	11
2.3. Evolución y desafíos de la Electromovilidad.....	20
2.4. Impactos de la carga de EV y BEB en las redes de distribución.....	23
2.5. Incentivos y beneficios para la adquisición y uso de EV en el país.....	27
2.6. Recarga de los EV y BEB.....	31
2.7. Parque de EV y BEB actual en la ciudad de Cuenca.....	36
2.8. Infraestructura de carga actual en la ciudad.....	36
3. El sistema de movilidad y transporte en la ciudad de Cuenca.....	40
3.1. Introducción.....	40
3.2. Antecedentes de la movilidad y transportación en la ciudad.....	40
3.3. Descripción de los medios de transporte público urbano de combustión interna existentes en la ciudad de Cuenca.....	43
3.4. El Sistema Tranvía de la ciudad de Cuenca.....	47
4. Características técnicas del proyecto tranvía.....	55
4.1. Introducción.....	55
4.2. Normativa eléctrica.....	55
4.3. Consideraciones para el dimensionamiento de la infraestructura eléctrica del proyecto tranvía.....	57
4.4. Descripción y especificaciones técnicas de la infraestructura eléctrica del proyecto tranvía.....	61
5. Consumo y eficiencia energética del sistema de transporte público.....	79
5.1. Introducción.....	79
5.2. Antecedentes.....	79
5.3. Consumo y eficiencia energética de los sistemas de transporte de combustión interna.....	82



5.4.	Consumo y eficiencia energética de los sistemas de transporte eléctrico	87
5.5.	Consumo y eficiencia energética de la etapa de pruebas del sistema tranviario	101
5.6.	Comparación de consumo y eficiencia energética entre los sistemas de transporte público analizados.....	107
6.	Implementación y simulación de la red eléctrica de alimentación del tranvía incorporando estaciones de carga.....	112
6.1.	Introducción	112
6.2.	Elementos que constituyen la red eléctrica de alimentación del tranvía.....	113
6.3.	Implementación de la red eléctrica de alimentación del tranvía y simulación en la plataforma OpenDSS.....	119
6.4.	Determinación de la ubicación geográfica de las estaciones de carga a incorporar en la red eléctrica del tranvía	130
6.5.	Características técnicas de los puntos de carga.....	133
6.6.	Modelado de perfiles de demanda.....	135
6.7.	Simulación de la red eléctrica integral de transporte público en OpenDSS.....	137
7.	Factibilidad técnica para la incorporación de estaciones de carga al sistema eléctrico de alimentación del tranvía.....	160
7.1.	Introducción	160
7.2.	Calidad de la Energía.....	160
7.3.	Regulación No. ARCONEL – 053/18.....	161
7.4.	Análisis de la demanda de la red eléctrica integral de transporte público en los distintos escenarios operativos	163
7.5.	Análisis de la energía eléctrica consumida por la red eléctrica integral de transporte público en los distintos escenarios operativos	164
7.6.	Análisis de las pérdidas de potencia en la red eléctrica integral de transporte público en los distintos escenarios operativos.....	165
7.7.	Análisis de niveles de voltajes en las Barras de MV y LV de la red eléctrica integral de transporte público en los distintos escenarios operativos	166
7.8.	Análisis del factor de potencia de la red eléctrica integral de transporte público en los distintos escenarios operativos.....	168
7.9.	Comparación de resultados obtenidos y determinación del escenario operativo más adecuado	168
7.10.	Reducción de emisiones de GEI en los escenarios simulados	173
8.	Conclusiones y recomendaciones	177
8.1.	Conclusiones	177
8.2.	Recomendaciones.....	180
	Referencias.....	183



Índice de Figuras

Figura 2.1. Componentes de un Vehículo y Autobús Eléctrico a baterías.....	11
Figura 2.2. Vehículo Híbrido Ligero (MHEV).....	13
Figura 2.3. Vehículo Híbrido (FHEV).....	14
Figura 2.4. Vehículo Híbrido Enchufable (PHEV).....	14
Figura 2.5. Vehículo Eléctrico Puro (BEV).....	15
Figura 2.6. Vehículo de Celda de Combustible de Hidrógeno (FCEV).....	16
Figura 2.7. Autobús Híbrido en Paralelo.	17
Figura 2.8. Autobús Eléctrico.	18
Figura 2.9. Emisiones de GEI evitadas por los EV en relación a los IEC en el mundo.....	19
Figura 2.10. Elementos de un cargador Nivel 1.....	32
Figura 2.11. Esquema de un cargador Nivel 2.....	32
Figura 2.12. Esquema de un cargador Nivel 4.....	33
Figura 2.13. Tipos de Conectores de los EV y PHEV.	35
Figura 2.14. Primera Estación de Carga Pública en la ciudad de Cuenca.....	37
Figura 2.15. Estación de Carga Rápida del Laboratorio de Microrred de la Universidad de Cuenca.	38
Figura 3.1. Índices de Motorización en la Ciudad de Cuenca.	42
Figura 3.2. Composición del Tráfico Motorizado en la Ciudad.	43
Figura 3.3. Longitud de cada ruta de Transporte Público.	46
Figura 3.4. Tranvía de la Ciudad de Cuenca.....	47
Figura 3.5. Recorrido del Tranvía de la Ciudad de Cuenca.	48
Figura 3.6. Localización de las Paradas en el Recorrido del Tranvía de la Ciudad de Cuenca.	51
Figura 3.7. Composición de una unidad del Tranvía de Cuenca.	51
Figura 3.8. Alimentación del Tranvía mediante tecnología LAC.....	52
Figura 3.9. Alimentación del Tranvía mediante tecnología APS.....	53
Figura 4.1. Recorrido de la Acometida desde el Alimentador 0428 hacia la SE-5.....	62
Figura 4.2. Recorrido de la Acometida desde el Alimentador 0528 hacia la SE-1.....	63
Figura 4.3. Ubicación geográfica de las SE de Tracción.	64
Figura 4.4. Esquema General de Línea con Distribución de SE.....	65
Figura 4.5. Diagrama Unifilar de la SEF desde SE 05.....	72
Figura 4.6. Diagrama Unifilar de la SEF desde SE 04.....	73
Figura 4.7. Diagrama Unifilar de la SEI (SE-02=SE-03=SE-04).....	74
Figura 4.8. Diagrama Unifilar de la SE-C/T.....	75
Figura 4.9. Esquema de la ocupación de ductos para el tendido de la Acometida en MT desde los Alimentadores.....	76
Figura 4.10. , Esquema de la ocupación de ductos para el tendido de la Red de MT y BT en las SEI.....	76
Figura 4.11. Esquema de la ocupación de ductos para el tendido de la Red de MT y BT en la SE-C/T....	77
Figura 5.1. Producción de Energía Primaria en el Ecuador.	80
Figura 5.2. Estructura del Consumo de Energía por Sectores en el Ecuador.....	81
Figura 5.3. Taxi Eléctrico BYD E5 y Vehículo Eléctrico KIA SOUL EV.....	89



Figura 5.4. Recorrido de la Ruta Tranviaria realizado con el Kia Soul EV.....	92
Figura 5.5. Perfil de Elevación y Velocidad en la Ruta del Tranvía.....	92
Figura 5.6. Perfil del Estado de Carga y Consumo Energético del Kia Soul EV en el Recorrido de la Ruta Tranviaria.....	93
Figura 5.7. Autobús Eléctrico Modelo K9FE del fabricante BYD.....	94
Figura 5.8. Autobús Eléctrico Modelo K9G del fabricante BYD.....	94
Figura 5.9. Estación de Carga del fabricante BYD.....	96
Figura 5.10. Perfil del Estado de Carga SOC en función de la variación de Altitud y Velocidad del recorrido.....	98
Figura 5.11. Perfil del Estado de Carga SOC del modelo matemático para el autobús eléctrico en la ruta tranviaria.....	99
Figura 5.12. Comportamiento de Pasajeros, Recorridos y Unidades durante el Período de Prueba.....	101
Figura 5.13. Consumo Energético Diario del Sistema Tranviario en el Período de Pruebas.....	102
Figura 5.14. Consumo Energético Diario por Tracción e Instalaciones del Sistema Tranviario en el Período de Pruebas.....	103
Figura 5.15. Perfil de Demanda Diario del Sistema Tranviario en el Período de Pruebas.....	104
Figura 5.16. Consumo Energético y Perfil de Demanda Diario de los días 23 y 30 de marzo.....	104
Figura 5.17. Comparación del Consumo y Eficiencia Energética del Taxi en un día de trabajo en la ciudad de Cuenca.....	107
Figura 5.18. Comparación del Consumo y Eficiencia Energética del Autobús en un día de trabajo en la ciudad de Cuenca.....	108
Figura 5.19. Comparación del Consumo y Eficiencia Energética de los medios de transporte eléctricos en la Ruta Tranviaria (Automóvil, Autobús y Tranvía).....	109
Figura 6.1. Diagrama Unifilar de la Red Eléctrica de Alimentación del Tranvía.....	115
Figura 6.2. Disposición de Elementos en las SE del Tranvía.....	117
Figura 6.3. Estructura de los objetos que se pueden emular en OpenDSS.....	120
Figura 6.4. Algoritmo Iterativo de Gauss para la Solución de Flujos de Potencia del OpenDSS.....	121
Figura 6.5. Estructura de los Objetos que se pueden emular en OpenDSS.....	122
Figura 6.6. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para los Escenarios Inicial y Horizonte.....	125
Figura 6.7. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para los Escenarios Inicial y Horizonte.....	126
Figura 6.8. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para los Escenarios Inicial y Horizonte.....	127
Figura 6.9. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para el Escenario de Pruebas.....	128
Figura 6.10. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para el Escenario de Pruebas.....	129
Figura 6.11. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para el Escenario de Pruebas.....	129
Figura 6.12. Ubicación Geográfica de SE del Tranvía y “Puntos de Carga”.....	131
Figura 6.13. Vista de las instalaciones del Coral Centro en la Av. de las Américas.....	131



Figura 6.14. Vista de las instalaciones de la Estación de Servicio P&S el Arenal en la Av. de las Américas. 132

Figura 6.15. Vista de las instalaciones de Expo Azuay en la Av. México..... 132

Figura 6.16. Vista de las instalaciones de la Estación de Servicio Clyan (Gasolinera PC) en la Av. España. 132

Figura 6.17. Vista de las instalaciones de la Estación de Transferencia El Arenal en la Av. de las Américas. 133

Figura 6.18. Vista de las instalaciones de la Estación de Transferencia Terminal Terrestre en la Av. España. 133

Figura 6.19. Perfil de Demanda para la simulación de Carga Rápida de EV. 136

Figura 6.20. Perfil de Demanda para la simulación de Carga Lenta de BEB. 136

Figura 6.21. Perfil de Demanda para la simulación de Carga Rápida de BEB. 137

Figura 6.22. Rangos horarios y número de puntos de carga para el Escenario 1..... 138

Figura 6.23. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para el Escenario 1..... 139

Figura 6.24. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para el Escenario 1..... 139

Figura 6.25. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para el Escenario 1..... 140

Figura 6.26. Rangos horarios y número de puntos de carga para el Escenario 2..... 141

Figura 6.27. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para el Escenario 2..... 141

Figura 6.28. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para el Escenario 2..... 141

Figura 6.29. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para el Escenario 2..... 142

Figura 6.30. Rangos horarios y número de puntos de carga para el Escenario 3..... 143

Figura 6.31. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para el Escenario 3..... 143

Figura 6.32. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para el Escenario 3..... 143

Figura 6.33. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para el Escenario 3..... 144

Figura 6.34. Rangos horarios y número de puntos de carga para el Escenario 4.1..... 145

Figura 6.35. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para el Escenario 4.1..... 145

Figura 6.36. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para el Escenario 4.1..... 145

Figura 6.37. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para el Escenario 4.1..... 146

Figura 6.38. Rangos horarios y número de puntos de carga para el Escenario 4.2..... 146

Figura 6.39. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para el Escenario 4.2..... 147

Figura 6.40. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para el Escenario 4.2..... 147

Figura 6.41. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para el Escenario 4.2..... 148

Figura 6.42. Rangos horarios y número de puntos de carga para el Escenario 5.1..... 149

Figura 6.43. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para el Escenario 5.1..... 149

Figura 6.44. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para el Escenario 5.1..... 149

Figura 6.45. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para el Escenario 5.1..... 150

Figura 6.46. Rangos horarios y número de puntos de carga para el Escenario 5.2..... 150

Figura 6.47. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para el Escenario 5.2..... 151

Figura 6.48. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para el Escenario 5.2..... 151

Figura 6.49. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para el Escenario 5.2..... 152

Figura 6.50. Rangos horarios y número de puntos de carga para el Escenario 6.1..... 153

Figura 6.51. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para el Escenario 6.1..... 153

Figura 6.52. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para el Escenario 6.1..... 153



Figura 6.53. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para el Escenario 6.1.	154
Figura 6.54. Rangos horarios y número de puntos de carga para el Escenario 6.2.....	154
Figura 6.55. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para el Escenario 6.2.	155
Figura 6.56. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para el Escenario 6.2.....	155
Figura 6.57. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para el Escenario 6.2.	156
Figura 6.58. Rango Horario y número de unidades en el Escenario 6.3.....	157
Figura 6.59. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para el Escenario 6.3.	157
Figura 6.60. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para el Escenario 6.3.....	157
Figura 6.61. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para el Escenario 6.3.	158
Figura 7.1. Factor de Utilización para los Escenarios Simulados.....	169
Figura 7.2. Demanda Máxima Promedio para cada Escenario.	169
Figura 7.3. Consumo Energético y Nro. de Unidades consideradas.	170
Figura 7.4. Porcentaje de Pérdidas de Potencia Totales del Circuito por Escenario.....	171
Figura 7.5. Niveles de Voltaje y Factor de Potencia del Circuito para los distintos Escenarios.....	171
Figura 7.6. Comparación de Resultados Obtenidos en la Cuantificación de los Criterios de Selección. .	173
Figura 7.7. Sectores Emisores de GEI en el Cantón Cuenca.	173



Índice de Tablas

Tabla 2.1. Cargos Tarifarios únicos para la Carga de EV.....	31
Tabla 3.1. Prioridad de Movilización de los distintos medios de Transporte	41
Tabla 3.2. Frecuencia de Uso de los distintos medios de Transporte	41
Tabla 3.3. Recorrido, Longitud e IPK de cada Línea de Transporte Público.	45
Tabla 3.4. Ubicación de las paradas del Tranvía de Cuenca.....	50
Tabla 3.5. Características Técnicas de los Motores de Tracción Tranviarios.....	52
Tabla 4.1. Normativas y Regulaciones que cumple el Proyecto Tranvía.	55
Tabla 4.2. Demanda y Energía aproximada de las Instalaciones del Tranvía.....	61
Tabla 4.3. Ubicación aproximada de SE de Alimentación a Línea.....	65
Tabla 4.4. Características Eléctricas de los Transformadores de Tracción en SE de Línea.	66
Tabla 4.5. Características Eléctricas de los Transformadores de Tracción en SE-C/T.....	67
Tabla 4.6. Características Eléctricas de Transformadores de Distribución CA estaciones y SSAA.	67
Tabla 4.7. Características Eléctricas de Transformadores de Distribución CA en Cocheras y Talleres y para SSAA de SE.	68
Tabla 5.1. Especificaciones Técnicas del fabricante de los vehículos más utilizados como taxi en Cuenca.	83
Tabla 5.2. Consumo y eficiencia energética diaria aproximada de una unidad de taxi en la ciudad de Cuenca.	84
Tabla 5.3. Consumo y eficiencia energética por carrera de una unidad de taxi en la ciudad de Cuenca. ...	84
Tabla 5.4. Especificaciones Técnicas de los autobuses en Cuenca.....	85
Tabla 5.5. Consumo de Energía Diario para las Rutas del Transporte Público Urbano de Combustión Interna en la ciudad de Cuenca.	86
Tabla 5.6. Especificaciones Técnicas de los EV utilizados como Taxi en la ciudad de Loja.....	90
Tabla 5.7. Consumo y eficiencia energética aproximada por carrera de un taxi eléctrico en la ciudad de Cuenca.	91
Tabla 5.8. Consumo y Eficiencia Energética del Automóvil Eléctrico Kia Soul EV en la Ruta del Tranvía.	93
Tabla 5.9. Especificaciones Técnicas del Autobús Eléctrico BYD K9G.....	95
Tabla 5.10. Especificaciones Técnicas del Banco de Baterías del Autobús Eléctrico BYD K9G.....	95
Tabla 5.11. Especificaciones Técnicas del Transformador.....	96
Tabla 5.12. Especificaciones Técnicas de la Estación de Carga modelo EVA080KI/01 proporcionada por BYD.....	96
Tabla 5.13. Resultados de la Prueba del recorrido del BEB BYD K9G en las Rutas de las Líneas 27 y 100.	97
Tabla 5.14. Consumo y Eficiencia Energética obtenido mediante el modelo matemático para el BEB en la Ruta Tranviaria.	99
Tabla 5.15. Especificaciones Técnicas de la Bicicleta Eléctrica utilizada en el estudio.....	100
Tabla 5.16. Consumo y Eficiencia Energética obtenido de la Bicicleta Eléctrica de Prueba en la ciudad.	100
Tabla 5.17. Consumo y Eficiencia Energética del Tranvía en el período de Pruebas.....	105



Tabla 5.18. Consumo y Eficiencia Energética diaria por recorrido de una unidad del Tranvía en el período de Pruebas.	106
Tabla 6.1. Parámetros de los Transformadores de Potencia en las SE 04 y 05.....	116
Tabla 6.2. Ubicación de los puntos de carga considerados.....	131
Tabla 7.1. Niveles de Variación de Voltaje Permitidos con respecto al Voltaje Nominal según Regulación Nro. ARCONEL - 053/18.	162
Tabla 7.2. Valores de Demanda Máxima de Potencia Activa y Reactiva para los distintos Escenarios Simulados.....	164
Tabla 7.3. Valores de Consumo Energético para los distintos Escenarios Simulados.....	164
Tabla 7.4. Valores de Pérdidas de Potencia en el Circuito para los distintos Escenarios Simulados.	166
Tabla 7.5. Niveles de Voltaje en las Barras de MV y LV en los Escenarios Simulados.	167
Tabla 7.6. Factor de Potencia en el Circuito para los Escenarios Simulados.	168
Tabla 7.7. Cuantificación de los Criterios Técnicos para cada Escenario Simulado.	172
Tabla 7.8. Determinación de la Reducción de Emisiones de GEI en el Escenario 1 de Simulación y en reemplazo del actual sistema de transporte público en la ciudad de Cuenca.	175



Cláusula de Propiedad Intelectual

Eddy Gabriel Bravo Padilla, autor del trabajo de titulación “Estudio de factibilidad técnica de un sistema integral de transporte público eléctrico. Caso de estudio: Integración de electrolineras a la infraestructura eléctrica del Tranvía de Cuenca”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 03 de junio de 2020

Eddy Gabriel Bravo Padilla

C.I: 0103975397



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Eddy Gabriel Bravo Padilla en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Estudio de factibilidad técnica de un sistema integral de transporte público eléctrico. Caso de estudio: Integración de electrolíneas a la infraestructura eléctrica del Tranvía de Cuenca”, 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, 03 de junio de 2020

Eddy Gabriel Bravo Padilla

C.I: 0103975397



Dedicatoria

Ante todo, este trabajo se lo debo a Dios quien me ha permitido culminar satisfactoriamente esta etapa extraordinaria de mi vida. Por su puesto quiero dedicar este trabajo a mi amada esposa Ma. Caridad, y a mis hermosos hijos Ma. Gracia y Benjamín, ya que sin su apoyo incondicional no hubiera sido posible alcanzar esta meta tan anhelada, conseguida con mucho esfuerzo y sacrificio; este trabajo es de ustedes y para ustedes mis amores...

También quiero dedicar este logro a mi madre y abuelitos, a quienes tengo una inmensa gratitud y siempre los llevo en mi mente y corazón, ya que fueron las personas que estuvieron desde siempre pendientes en darme lo necesario para forjar mi futuro.



Agradecimientos

Son muchas las personas que han contribuido de alguna manera en el proceso y conclusión de este trabajo. Agradezco en primera instancia al personal técnico del Laboratorio de Microrredes de la Universidad de Cuenca por el apoyo brindado, y de manera especial al Dr. Luis González Morales, motivador y director de esta tesis, que desde su amplia experiencia en el tema supo aportar significativamente en el enriquecimiento y calidad de esta tesis.

Adicionalmente A los Doctores .Juan Leonardo Espinoza y Julio López por sus valiosas contribuciones en beneficio de este trabajo investigativo.

Al Mgst. Jaime Guzmán Crespo, ex Director Coordinador General del Proyecto Tranvía de Cuenca por brindar el aval para la realización del proyecto, y al Ing. Juan Ordoñez Ríos, técnico de la Unidad Ejecutora por el apoyo necesario en el desarrollo de esta investigación.



Nomenclatura

IEA	Agencia Internacional de la Energía
IVA	Impuesto al Valor Agregado
SITM-Q	Sistema Integrado de Transporte Masivo de Quito
AC	Corriente Alterna
DC	Corriente Contínua
ICE	Vehículos de Combustión Interna
MHEV	Vehículos Híbridos Ligeros
FHEV	Vehículos Híbridos
PHEV	Vehículos Híbridos Enchufables
BEV, EV	Vehículos Eléctricos a Batería
FCEV	Vehículos Eléctricos de Celda de Combustible de Hidrógeno
BEB	Autobús Eléctrico a Batería
W	Vatios
kW	Kilovatios
MW	Megavatio
kWh	Kilowatt-hora
MWh	Megawatt-hora
TWh	Terawatt-hora
km	Kilómetro
Mt CO ₂ – eq	Millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente
CO ₂	Dióxido de carbono
Mtoe	Millones de toneladas equivalentes de petróleo
Mb/d	Millones de barriles de petróleo al día
SNEE	Sistema Nacional de Eficiencia Energética
GAD	Gobiernos Autónomos Descentralizados
ARCONEL	Agencia de Regulación y Control de Electricidad
AMI	Infraestructura de Medición Avanzada
V	Voltios
kV	Kilovoltio
USD	Dólar estadounidense
FGDVE	Factor de gestión de la demanda
VCA	Voltaje en corriente alterna
VDC	Voltaje en corriente contínua
SOC	Estado de carga de la batería
EMOV EP	Empresa de Movilidad de la ciudad de Cuenca



AEADE	Asociación de empresas automotrices del Ecuador
A	Amperio
kVA	Kilovoltio amperio
MVA	Megavoltio amperio
kVAr	Kilovoltio amperio reactivo
MVAr	Megavoltio amperio reactivo
PMEP	Plan de movilidad y espacios públicos
IPK	Índice de pasajeros por kilómetro
TM	Tasa de motorización
PK	Punto kilométrico
Km/h	Kilómetro por hora
LAC	Línea aérea de contacto
APS	Alimentación por suelo
m ²	Metro cuadrado
PLC	Controlador lógico programable
EERCS	Empresa Eléctrica Regional Centrosur C.A.
SE	Subestación eléctrica
F	Fase
H	Hilo
kcmil	Kilo circular mil
Cu	Cobre
XLPE	Aislamiento de polietileno reticulado
SEF	Subestación de Tracción Rectificadora de Alimentación de Final de Línea
SEI	Subestación de Tracción Rectificadora de Alimentación Intermedia
SE-C/T	Subestación Rectificadora de Alimentación a Instalaciones Propias de las cocheras y talleres
m	Metro
msnm	Metros sobre el nivel del mar
AT	Alta tensión
MT	Media tensión
BT	Baja tensión
Hz	Hertz
AWG	Calibre de alambre estadounidense
MERNNR	Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables
L	Litros
gal	Galones
rpm	Revoluciones por minuto



m/J	metro por Joule
SI	Sistema Internacional
J/m	Joule por metro
km/L	Kilómetro por litro
mi/gal, MPG	Milla por galón
L/100 km	Litros por cada 100 kilómetros
gal/100 mi	Galones por cada 100 millas
kWh/p	Kilowatt-hora por pasajero
N.m	Newton por metro
Ah	Amperios hora
h	Hora
MP2.5	Partículas en suspensión de menos de 2.5 micras provenientes de los vehículos diésel
SOC_{ACTUAL}	Estado de carga actual de la batería
$E_{CONSUMO}$	Variable de consumo de energía
ΔSOC	Variación del estado de carga de la batería
Δv	Variación de la velocidad
Δh	Variación de la altura
TSA	Transformador de servicios auxiliares
TRL	Transformador de tracción de línea
DER	Recursos de energía distribuida
HV	Alto voltaje
MV	Medio voltaje
LV	Bajo voltaje
pu	Por unidad
Scada	Sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos
FP	Factor de potencia
GEI	Gases de efecto invernadero
t de CO ₂ e	Toneladas de dióxido de carbono equivalente
kg de CO ₂ e	Kilogramos de dióxido de carbono equivalente
TEP	Toneladas equivalente de petróleo
Bep	Barriles equivalentes de petróleo



1. Introducción

La transición hacia la movilidad eléctrica crece exponencialmente en el mundo. En 2018, la flota mundial de EV superó los 5.1 millones de unidades, 2 millones más que en el año 2017 y se espera que para el 2030 ascienda hasta los 125 millones [1]. Aunque el avance de la tecnología entre países es disímil; los niveles de adopción aún son relativamente bajos en la mayor parte de países, a excepción de algunos que lideran tecnológicamente y comercialmente el mercado. Un ejemplo de esta situación es China que lidera la producción y puesta en marcha de la movilidad eléctrica tanto en EV, generalmente de transporte público, como de infraestructura de recarga. Con casi 1.1 millones de EV vendidos en 2018 y, con 2.3 millones de unidades en operación, China representa casi la mitad del stock mundial de automóviles eléctricos [1]. Otros países en Europa presentan también un importante avance, a pesar de que reportan un volumen de ventas menores en relación a China, destacan por un alto grado de penetración de la movilidad eléctrica alcanzando alrededor de 1.2 millones de EV [2]. Estados Unidos no se queda atrás con 1.1 millones de unidades en la carretera para fines de 2018 y un crecimiento del mercado de 385,000 EV con respecto al año anterior [1].

Si bien América Latina no es líder de esta transición, existen ya evidencias concluyentes de que este proceso se lo lleva por buen camino, ya que el principal problema de los países de la región es la alta dependencia del carbono como fuente energética, y sobre todo la contaminación ambiental del actual sistema de transporte. Estos sistemas de transporte comúnmente utilizan fuentes de energía no renovables poco eficientes energéticamente y altamente contaminantes. En la actualidad, Latinoamérica cuenta con el mayor número de personas que viven en centros urbanos en todo el planeta y es la región donde cada año mueren prematuramente más de 50,000 personas debido a la contaminación atmosférica causada principalmente por el sistema de transporte [3]. Para el año 2050, según la IEA [3], el crecimiento de la flota de automóviles en la región podría triplicarse llegando a superar los 200 millones de unidades. Esto tendría un efecto dramático en la demanda de combustibles fósiles, en el aumento de las emisiones de GEI a la



atmósfera, que se podrían incrementar hasta un 70%, y otros contaminantes emitidos por este sector [3]. Debido al problema del crecimiento descontrolado del parque automotor en los próximos años, los gobiernos y empresas privadas de la región y el mundo están en la obligación de cambiar el paradigma actual y proponer estrategias para un sistema de transporte más sostenible, eficiente y limpio [4]. Una de ellas es la sustitución de sus flotas de transporte actuales por sistemas de movilidad eléctrica entre otros, mediante el establecimiento de condiciones habilitantes, la disponibilidad de redes de recarga y la aplicación de normas de emisiones y políticas de eficiencia energética más estrictas para vehículos convencionales. Con la masificación de la movilidad eléctrica en la región, se tendría una disminución importante en las emisiones de CO_2 a la atmósfera y un ahorro millonario en combustibles fósiles [3].

Tal es el caso de Brasil que es uno de los principales productores de EV en el mundo [2], además de incorporar, desde hace muchos años, biocombustibles como el Etanol para sustituir en parte su demanda de combustibles fósiles. Colombia, en el 2018, reportó más de mil EV vendidos y la cifra sigue en aumento [2]. Chile incorporó de forma masiva una cantidad importante de buses y taxis eléctricos provenientes de China en el sistema de transporte público de Santiago denominado “Red Metropolitana de Movilidad”, que hasta marzo del 2019 se denominaba “Transantiago” [2]. Algunas otras ciudades como Bogotá, Loja y Ciudad de México que también incorporaron flotas de taxis eléctricos a sus sistemas de transporte público [2]. Un paso más allá lo han dado Brasil, Uruguay y México instalando corredores interprovinciales de recarga rápida de EV, y sobre todo Costa Rica que aprobó a finales del 2017 la primera ley integral de promoción e incentivo al transporte eléctrico conocida localmente como Ley 9518 con miras a una descarbonización de su economía y la total liberación de combustibles fósiles en el transporte, ya que su abastecimiento eléctrico es casi 100% renovable en la actualidad [2].

Como se puede evidenciar muchos de los países de la región no se han quedado atrás en materia de movilidad eléctrica, incluyendo el Ecuador. Es así que en el país se cuentan con políticas y leyes de incentivos a la adquisición de bienes y servicios a favor de la descarbonización del transporte y así promover el uso eficiente, racional y sostenible de la energía. Por ejemplo, en Ecuador, la Ley Orgánica para el Fomento Productivo [5], expedida el 21 de agosto de 2018, exonera del impuesto a la renta e impuesto al valor agregado a EV para uso particular, transporte



público y de carga; así también la Ley Orgánica de Eficiencia Energética [6], expedida y vigente desde el 19 de marzo de 2019, que plantea el uso obligatorio de EV de uso público a partir del año 2025. En cumplimiento con esta ley a nivel local, la ciudad de Loja tiene incorporada, desde el año 2017, una flota de 50 taxis eléctricos denominado “EcoTaxi” y un punto de recarga rápida para los mismos [7]. En la capital el Metro de Quito se constituye como la red subterránea del Sistema Integrado de Transporte Masivo de Quito (SITM-Q) que se espera inicie su operación comercial a finales del 2020, está conformado por 6 vagones a base de energía eléctrica y que acogerá alrededor de 400,000 pasajeros por día reemplazando a diez unidades del sistema Trolebús [8]. Además, la ciudad inició en el año 2018 un plan piloto de operación de BEB, que fue adoptado posteriormente por un operador en Guayaquil incorporando a su flota 20 BEB que reemplazaron a 20 unidades a diésel [9]. En el archipiélago de Galápagos se instalaron tres puntos de recarga para una flota de 25 EV gracias al aporte de la empresa privada y el gobierno local [10].

En la ciudad de Cuenca se realizaron estudios de BEB y EV de prueba y se planea la instalación de estaciones de recarga en distintos puntos de la ciudad y provincia, gracias a la gestión de la empresa privada, y de esta manera incentivar la adquisición de los EV que por el momento no tienen la aceptación deseada. Sin embargo, la ciudad cuenta con uno de los proyectos más emblemáticos de la administración municipal como lo es el Sistema Tranvía de Cuenca, financiado entre el Gobierno del Ecuador con un aporte del 80% y la Alcaldía de Cuenca con el restante 20% [11], considerado el mayor sistema de transporte eléctrico público de la ciudad, que recorrerá las principales calles y avenidas de la urbe transportando alrededor de 120,000 pasajeros al día, reduciendo considerablemente la demanda de combustibles fósiles de los vehículos y autobuses convencionales, la congestión vehicular en horas pico, el ruido excesivo y la contaminación ambiental [12].

Debido a la importancia de la incorporación de la movilidad eléctrica en el sistema de transporte público de la ciudad de Cuenca en cumplimiento con la Ley de Eficiencia Energética, el Estado Central debe seguir generando condiciones de mercado favorables para fomentar la demanda, adquisición e integración de EV y BEB. Para ello se deben brindar incentivos fiscales y financieros, incremento en el sector de generación eléctrica, facilidades tecnológicas, redes de



distribución confiables y sobre todo, la suficiente infraestructura de recarga para impulsar su crecimiento de manera que la electricidad como fuente de energía sea cada vez más competente frente a los combustibles fósiles. En la ciudad no se ha tenido un mayor avance en relación a la movilidad eléctrica debido principalmente a que no se cuenta aún con una infraestructura de recarga adecuada, constituyéndose en el principal problema para que no se incentive la adquisición y el uso de este tipo de unidades y aprovechar todas las ventajas que la movilidad eléctrica brinda al ser un sistema más sostenible y eficiente energéticamente, más amigable con el medio ambiente y ofrecer un gran potencial de integración con energías renovables. Es por ello que se hace necesario el aprovechamiento de la tecnología e infraestructura disponible en la ciudad para conseguir una integración óptima y acelerada de tranvía, EV y BEB de tal forma que se conviertan en una solución rentable y además revertir los impactos negativos del actual sistema de transporte urbano y mejorar la calidad de vida en la ciudad.

La propuesta de este estudio se basa en brindar una solución viable al problema de transición del actual sistema de transporte público de la ciudad de Cuenca, basado en una fuente energética a base de combustibles fósiles, hacia un sistema integral de transporte público eléctrico, al no contar con la infraestructura de carga necesaria. Para ello se ha determinado la factibilidad técnica de dotar de infraestructura de carga para EV y BEB, incorporando electrolineras a la red eléctrica de alimentación del tranvía existente, y de esta manera propiciar un escenario adecuado para la inserción de este tipo de unidades de tracción eléctrica dentro de un sistema integral de transporte público que se pretende implementar en la ciudad. Otra de las propuestas de este proyecto de investigación es el de presentar al lector un argumento válido y sustentado del porque se debería considerar la transición del actual sistema de transporte público hacia la movilidad eléctrica. En cumplimiento con esta propuesta, se realiza un estudio energético para determinar el consumo y eficiencia energética de los sistemas de transporte público actuales en la ciudad y sus símiles eléctricos. Esto con la finalidad de evidenciar y cuantificar el ahorro en el consumo energético y el incremento de la eficiencia energética que presentan las unidades eléctricas frente a las de combustión interna, si estas realizaran la misma operación comercial en la ciudad de Cuenca. Además, se determina de forma experimental el consumo y eficiencia energética que presentan el EV y BEB, que podrían prestar sus servicios como taxi y autobús de



transporte público respectivamente, si realizarán la misma ruta comercial del tranvía y establecer cuál de las opciones resulta más rentable y conveniente desde un punto de vista energético. Como un estudio adicional a la propuesta planteada, se presenta una estimación de la reducción de GEI que se podría generar en la ciudad si se considera el reemplazo de la flota de autobuses y taxi convencionales de transporte público por BEB y EV respectivamente.

1.1. Problemática

El Estado Ecuatoriano busca la descarbonización de su economía y la mitigación de los impactos ambientales del sistema de transporte público actual, por lo que, apuesta por una solución basada en energía eléctrica para reducir el consumo de combustibles fósiles promoviendo el desarrollo de la movilidad eléctrica en las distintas urbes del país estableciendo incentivos económicos y políticas de eficiencia energética.

Un ejemplo de esta propuesta es la incorporación del proyecto Tranvía de Cuenca al sistema de transporte público de la ciudad, buscando solventar los problemas de demanda de combustibles fósiles, de movilidad y contaminación ambiental. Si bien el tranvía en la actualidad no se encuentra en operación, la unidad ejecutora del proyecto busca una mejor gestión de la demanda, incremento su eficiencia energética y rentabilidad económica para minimizar los gastos operativos y de mantenimiento que su funcionamiento generan.

El principal problema de la transición del actual sistema de transporte público de la ciudad de Cuenca, basado en energías no renovables hacia la movilidad eléctrica, es la falta de una adecuada infraestructura de carga para las unidades de tracción eléctrica a batería. Esta situación provoca que no se den las condiciones necesarias para incentivar la adquisición y uso de este tipo de unidades basadas en electricidad.

Para ello se buscan alternativas viables y sustentables que, por un lado, permitan el aprovechamiento óptimo de la tecnología e infraestructura eléctrica disponible en la ciudad, principalmente la construida para la operación del tranvía, y, por otro lado, se brinden las facilidades que incentiven la utilización de sistemas de transporte eficientes y amigables con el



ambiente hacia la implementación de un moderno sistema integral de transporte público acorde a las exigencias actuales y futuras.

1.2. Justificación

Debido al interés del Gobierno Nacional y la Municipalidad de Cuenca en incentivar los sistemas de movilidad eléctrica como una alternativa eficiente, rentable y sustentable a los problemas del transporte público actual y conseguir un sistema de “movilidad integral” que reduzca los impactos económicos, sociales y ambientales generados por los medios de transporte de combustión interna; se propone el estudio de factibilidad técnica de una red eléctrica en donde se integre el sistema tranvía, automóviles y autobuses eléctricos, utilizando la infraestructura existente de alimentación del tranvía para colocar estaciones de carga (electrolineras) en puntos a lo largo de la ruta para el uso de los mismos en períodos no operativos o de baja demanda del sistema de distribución eléctrica que lo abastece. Por otro lado, se propone el estudio energético del actual sistema de transporte público en la ciudad de Cuenca en relación a sus símiles eléctricos para justificar la transición hacia la movilidad eléctrica.

1.3. Alcance

Determinar y comparar el consumo y eficiencia energética de los sistemas de transporte público de combustión y eléctricos, y justificar la transición hacia la movilidad eléctrica del actual sistema de transporte público en la ciudad de Cuenca. Establecer la factibilidad técnica de la incorporación de electrolineras a la red eléctrica del tranvía para la carga de EV y BEB dentro de un sistema integrado de transporte público eléctrico que se pretende implementar. Esta alternativa se analizará mediante simulaciones en OpenDSS de la operación del sistema integrado de transporte público eléctrico ante diferentes escenarios operativos de demanda generados por el consumo energético típico del tranvía y electrolineras para la carga de EV y BEB, y de esta forma mejorar aspectos técnicos de la red eléctrica de alimentación actual del sistema tranviario.



1.4. Objetivos

La propuesta tiene como objetivos justificar la transición hacia la movilidad eléctrica del actual sistema de transporte público y determinar la factibilidad técnica de implementar un Sistema Integral de Transporte Público Eléctrico en la ciudad de Cuenca, incorporando estaciones de carga de EV y BEB a la infraestructura eléctrica disponible del tranvía y evidenciar el impacto que generarían en la red eléctrica de alimentación exclusiva del tranvía. Para ello, se hace necesario:

- El estudio del estado del arte de los sistemas integrados de movilidad eléctrica y como estos impactan en las redes de distribución eléctrica.
- Determinar la composición del sistema de transporte público de la ciudad de Cuenca.
- Estudio de las características técnicas del proyecto tranvía de la ciudad de Cuenca.
- Determinar el consumo y eficiencia energética de los sistemas de transporte público de combustión interna actuales en la ciudad de Cuenca y de sus símiles de tracción eléctrica.
- Implementar un sistema de alimentación de energía eléctrica integrado incorporando electrolinerías al sistema eléctrico de alimentación del tranvía en el software OpenDSS.
- Simular distintos escenarios operativos de demanda diaria debido a la inclusión de electrolinerías y tranvía al sistema de alimentación de energía eléctrica, mediante el software OpenDSS.
- Estudio de factibilidad técnica para la incorporación de electrolinerías a la red eléctrica de alimentación del sistema tranviario dentro del marco de un sistema integrado de transporte público eléctrico mediante el software OpenDSS.
- Determinar el impacto ambiental de la sustitución de los sistemas convencionales de transporte público alimentados por combustibles fósiles en la ciudad de Cuenca a sistemas mediante tracción eléctrica.



2. Estado del Arte: Movilidad Eléctrica

2.1. Antecedentes de la movilidad eléctrica

Dentro del contexto de análisis de la movilidad eléctrica a nivel mundial que nace a finales del siglo XX debido a la preocupación por el cambio climático y la contaminación ambiental generada por los ICE y la escasa reserva de combustibles fósiles necesarios para su funcionamiento, surge la necesidad de la inserción de un nuevo tipo de tecnología de tracción para los vehículos que sea menos contaminante y libre de consumo de combustibles fósiles. Es por esto que las industrias automotrices se han visto en la necesidad de enfocar sus esfuerzos en producir vehículos más eficientes energéticamente y menos contaminantes, teniendo como consecuencia el resurgimiento del vehículo de tracción eléctrica a inicios del siglo XXI [10], y el reciente desarrollo de vehículos con motores eléctricos alimentados por celdas de combustible de hidrógeno. En la actualidad esta tecnología se encuentra en etapa de masificación, pero en un futuro serán técnica y económicamente competentes y reemplazarán a los VE por su rapidez de recarga y prestaciones comparables a los ICE en relación a la movilidad en ciclos de trabajo alto como los vehículos de carretera de largo alcance y utilización, en donde los EV tienen aún ciertas limitaciones [13].

Es así que, a partir del año 2010, varios países principalmente con altos niveles de contaminación como Estados Unidos, Reino Unido, Alemania, Francia y China entre otros, comprometidos en la lucha contra el cambio climático comenzaron a adoptar los EV para el transporte de pasajeros o unipersonales promovidos por sus gobiernos y regulaciones y por acciones directas de empresas automotrices como Toyota, Nissan y BMW que comenzaron a fabricar y comercializar vehículos híbridos y eléctricos. En la región en países como Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, México, Paraguay y Uruguay, se evidencian diversas acciones y gestiones

para generar una mayor inserción y adopción del EV contribuyendo al desarrollo de la electromovilidad en el corto y mediano plazo [10].

Sin embargo, al hablar del EV como agente fundamental de la electromovilidad, se requiere considerar también las características de cada una de las tecnologías actuales, los avances en los diferentes tipos de baterías y autonomía de los vehículos, la infraestructura de carga disponible, la evolución de precios, la capacidad de los países de producción o necesidades de importación, las políticas, leyes de estímulos por parte de los gobiernos nacionales y locales para la adopción de estas tecnologías y las limitantes de las regulaciones medioambientales [10].

2.2. El vehículo y autobús eléctrico a baterías

2.2.1. Definición

Los vehículos eléctricos de forma general (EV y BEB) son aquellos destinados para el transporte de personas o bienes propulsados de forma total o parcial por uno o varios motores eléctricos que utilizan energía eléctrica procedente de baterías que se recargan tomando la energía eléctrica de la red a través de una estación de carga o electrolinería. Los principales componentes de un EV y BEB se identifican en la figura 2.1, como motor eléctrico, convertidor, baterías de tracción y auxiliar, el puerto de carga, el cargador a bordo, el controlador electrónico de potencia y la transmisión.

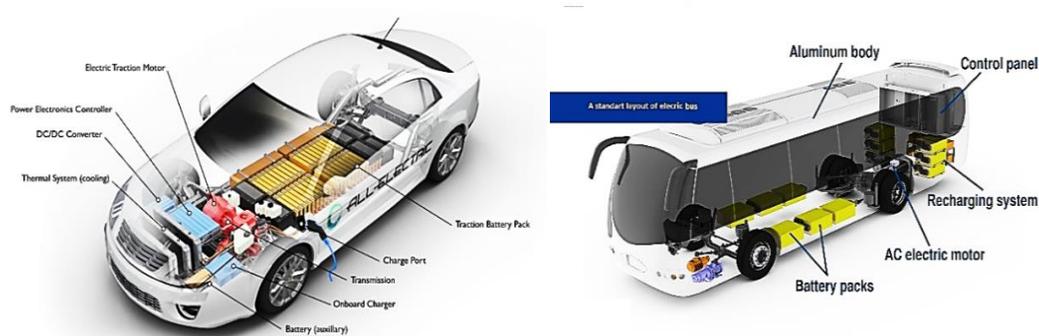


Figura 2.1. Componentes de un Vehículo y Autobús Eléctrico a baterías
Fuente: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>



El motor eléctrico proporciona la tracción para rotar las ruedas del vehículo utilizando la energía eléctrica almacenada en las baterías de tracción, siendo los más comunes los motores que funcionan con AC. El proceso de frenado se realiza en dos etapas, una eléctrica y otra mecánica. En el proceso de frenado eléctrico, mediante electrónica de potencia se invierte la fase del motor para convertirlo en un generador propiciando así una etapa de recarga de la batería de tracción denominada freno regenerativo, mientras que la otra etapa corresponde al frenado convencional por contacto mecánico de la zapata con el disco de freno siendo menos eficiente que la anterior etapa ya que la energía se disipa en forma de calor debido a la fricción de las partes. En un futuro se espera que el proceso de frenado regenerativo sea completamente eléctrico mejorando su eficiencia y aprovechando toda la energía para la recarga de las baterías.

El convertidor DC toma el voltaje de las baterías de tracción y la convierte a un nivel de menor voltaje que pueden manejar los accesorios del vehículo y contribuir adicionalmente a la recarga de la batería auxiliar. Las baterías de tracción es el elemento más esencial de todo EV ya que almacenan la energía eléctrica para suministrarla al motor de tracción cuando se requiera, mientras que la batería auxiliar proporciona la energía requerida por los accesorios del vehículo. El puerto de carga permite que el vehículo se conecte a una fuente de alimentación externa, denominada electrolinera o estación de carga que, absorbe la energía de la red eléctrica y recarga las baterías de tracción a través del cargador a bordo que toma la AC de la fuente y la convierte en DC. El controlador electrónico de potencia gestiona la cantidad de energía proveniente de las baterías de tracción hacia el motor necesaria para producir determinada velocidad y torque. La transmisión transfiere la energía mecánica en el eje del motor hacia las ruedas del vehículo.

2.2.2. Tipología:

Los tipos de EV comerciales se pueden clasificar en híbridos ligeros o *mid-hybrids* (MHEV), los híbridos o *full-hybrids* (HEV o FHEV), los híbridos enchufables o *plug-in* (PHEV), los 100% eléctricos (BEV o EV). En la actualidad se están desarrollando motores eléctricos que se abastecen de celdas de combustible de hidrógeno (FCEV) [10].

2.2.2.1. Vehículos Híbridos Ligeros (MHEV):

Este tipo de vehículo se presenta en la figura 2.2, en donde a través de su sistema eléctrico, proporciona un cierto par mecánico al motor de combustión interna y reduce la continua operación del alternador y de esta forma la cantidad de energía que el motor consume. Este sistema, además, no necesita conectarse a la red eléctrica para alimentarse ya que recarga su batería a través de su convertidor con la energía eléctrica que el generador transforma de la energía cinética del movimiento del vehículo [10]. La capacidad de la batería está alrededor de 1 kWh, una autonomía de hasta 600 km debido a su motor de combustión interna y una reducción del 20% en las emisiones de GEI [10].



Figura 2.2. Vehículo Híbrido Ligero (MHEV)
Fuente: <https://www.landrover.com.mx/>

2.2.2.2. Vehículos Híbridos (FHEV):

Como se observa en la figura 2.3, y a diferencia del MHEV, es un vehículo conformado además por un motor eléctrico que toma la energía eléctrica directamente de la batería y la transforma en energía mecánica para la tracción de las ruedas cuando el vehículo circula a bajas velocidades en distancias cortas. Cuando el vehículo incrementa la velocidad y distancia de recorrido, la tracción se alterna entre la proporcionada por el motor eléctrico y el motor de combustión interna. Además, el vehículo aprovecha la energía liberada en el proceso de aceleración y frenado para la recarga de su batería (freno regenerativo). Su batería tiene una capacidad de 1 kWh, su autonomía se debe a su motor de combustión interna que oscila alrededor de los 600 km y reduce las emisiones en un 30% en relación al ICE, es decir, una reducción adicional del 10% en

relación al MHEV [10].

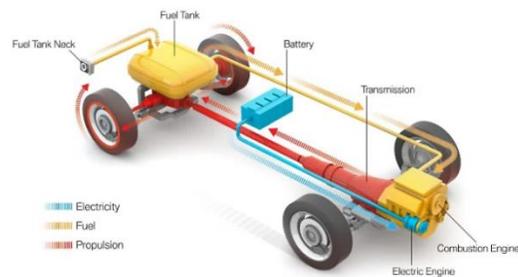


Figura 2.3. Vehículo Híbrido (FHEV)

Fuente: <https://www.bmw.com/en/innovation/Plug-in-hybrid-and-other-kinds-of-electric-cars.html>

2.2.2.3. Vehículos Híbridos Enchufables (PHEV):

Como se observa en la figura 2.4, Se trata de un vehículo híbrido convencional con la diferencia de que han incorporado un punto de carga para la alimentación de la batería desde la red eléctrica a través de una electrolinera o estación de carga, tecnología propia de los BEV. Su capacidad oscila entre los 8 y 10 kWh con una autonomía cercana a los 50 km [14]. Su batería puede entregar hasta 16 kWh de energía. Su autonomía puede alcanzar los 600 km debido a su motor de combustión interna y adicionalmente el motor eléctrico puede proporcionar hasta 96 km. Las emisiones se pueden reducir hasta un 80% dependiendo del ciclo de manejo del conductor [10].

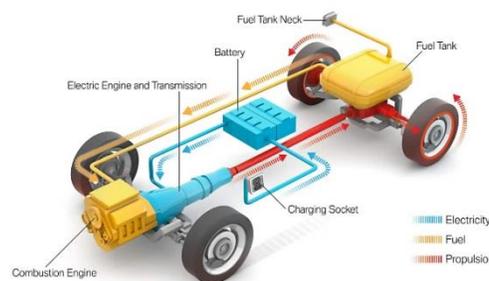


Figura 2.4. Vehículo Híbrido Enchufable (PHEV)

Fuente: <https://www.bmw.com/en/innovation/Plug-in-hybrid-and-other-kinds-of-electric-cars.html>

2.2.2.4. Vehículo Eléctrico Puro (BEV o EV):

Los vehículos eléctricos puros como el de la figura 2.5, contienen baterías recargables

desde la red eléctrica mucho más grandes alcanzando una capacidad de hasta 100 kWh y de tecnología superior en relación a los híbridos, que alimentan al motor eléctrico permitiéndole alcanzar altas velocidades y una autonomía que puede llegar a ser superior a los 500 km, características comparables en la actualidad con los ICE. El gran desafío en el desarrollo y masificación de estos vehículos es la fabricación masiva de baterías recargables de ácido de plomo, hidróxido de níquel o iones de litio, con alto nivel de capacidad y autonomía a un costo cada vez menor. Su ventaja en relación a los ICE es su torque instantáneo y alta eficiencia en transmisión de energía de la batería a la rueda (alrededor del 90%), sin contar que al no haber proceso de combustión, las emisiones e impacto sonoro de su funcionamiento son prácticamente nulos [10].

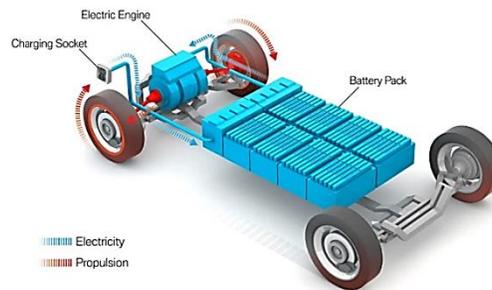


Figura 2.5. Vehículo Eléctrico Puro (BEV)

Fuente: <https://www.bmw.com/en/innovation/Plug-in-hybrid-and-other-kinds-of-electric-cars.html>

2.2.2.5. Vehículos de Celdas de Combustible de Hidrógeno (FCEV):

Los vehículos como el de la figura 2.6, poseen un tanque donde se almacena hidrógeno comprimido, el cual en conjunto con el oxígeno del aire reaccionan en el proceso de oxidación y producción de la corriente eléctrica que alimenta el motor eléctrico. La autonomía de este tipo de vehículos es comparable con los eléctricos, al igual que sus emisiones son nulas (al menos durante su operación), con excepción de vapor de agua y aire caliente. Sin embargo, una de sus desventajas es que la producción de hidrógeno requiere una gran cantidad de energía eléctrica. Si bien la mayoría de las grandes compañías del sector automotor han ensayado modelos de pila de combustible, esta tecnología aún no se ha masificado y es probable que tarde varios años más en alcanzar un grado de penetración significativa, debido sobre todo a la falta de una infraestructura

de recarga de hidrógeno para este tipo de vehículos [10].

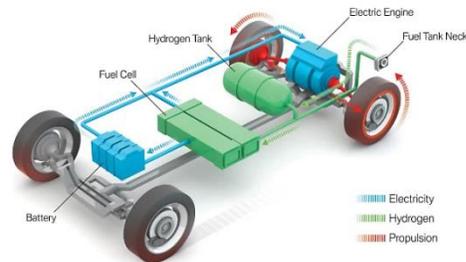


Figura 2.6. Vehículo de Celda de Combustible de Hidrógeno (FCEV)

Fuente: <https://www.bmw.com/en/innovation/Plug-in-hybrid-and-other-kinds-of-electric-cars.html>

Los autobuses de tracción eléctrica se clasifican generalmente en híbridos y eléctricos, caracterizándose de los autobuses a diésel por su mayor eficiencia energética y bajo nivel de emisiones de carbono.

2.2.2.6. Autobuses Híbridos:

Según se describe en [15], los autobuses híbridos como el de la figura 2.7, denominados también como diésel-eléctricos combinan un motor convencional de combustión interna con un sistema de propulsión eléctrico. Usan tecnologías para mejorar la eficiencia como el freno regenerativo, convirtiendo la energía cinética del vehículo en energía eléctrica para cargar la batería en lugar de disiparla en forma de calor cada vez que el vehículo desacelera. En general, los vehículos híbridos y eléctricos se pueden clasificar de acuerdo a la fuente de poder que llega al tren de conducción, así podemos tener vehículos en paralelo o en serie.

Los autobuses híbridos en paralelo combinan su motor de combustión interna y el motor eléctrico para proporcionar la tracción mecánica a la transmisión y producir el giro de las ruedas, mientras que los híbridos en serie, solo el motor eléctrico proporciona la tracción a la transmisión y el motor de combustión interna trabaja como un generador para alimentar al motor eléctrico o para recargar las baterías. Los buses híbridos no requieren inversiones adicionales en infraestructura de carga para su batería.

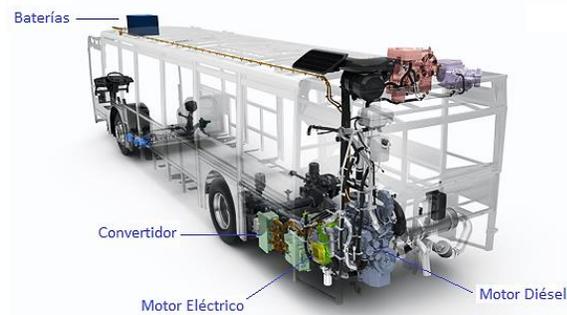


Figura 2.7. Autobús Híbrido en Paralelo.

Fuente: https://sony872.blog.hu/2018/02/12/hasznalt_hibridek_budapesten

2.2.2.7. Autobuses Eléctricos (BEB):

Según se describe en [15], los BEB como el de la figura 2.8, son propulsados por motores eléctricos gobernados por un conjunto de controladores que regulan la potencia de los motores. Estos autobuses pueden estar conectados permanentemente a cables (catenarias) o temporalmente a una infraestructura de carga rápida (electrolinera) o un complejo sistema inalámbrico para acumular electricidad, o usar baterías que necesitan ser cargadas con una fuente eléctrica y recargadas después de algunas horas y/o varias veces al día, ya sea por segundos a través de supercapacitores o por minutos a través de baterías proporcionando una autonomía que va desde los 30 a 300 km respectivamente. Las emisiones generadas por el BEB en su conducción son prácticamente nulas. Dependiendo de la tecnología elegida, una flota de BEB requiere instalaciones de infraestructura de catenarias en las vías, o estaciones de recarga en los terminales de buses o instalaciones destinadas para este uso. Los BEB requieren una combinación entre carga rápida y largas sesiones de carga durante la noche o varias recargas al día en las paradas de autobuses. Cualquiera que sea el requerimiento, éste implica hacer cambios en la base de operaciones (terminales) de las empresas que manejan estas unidades.

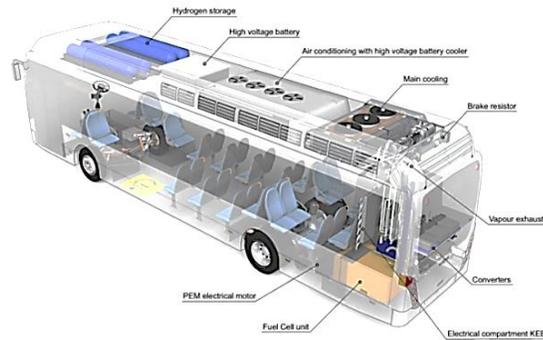


Figura 2.8. Autobús Eléctrico.

Fuente: <https://cutaactu.ca/en/news-media/other-electric-bus>

2.2.3. Ventajas y desventajas de los EV:

Como ya se mencionó anteriormente, las ventajas significativas de la utilización de los EV con respecto a los ICE convencionales más allá de su confort en la conducción y su superioridad técnico-ecológica, se diferencian en los siguientes aspectos:

- Su notable reducción de emisiones de GEI, contribuyendo a la mejora de la calidad de aire en las ciudades y la salud de sus habitantes. Así en el 2018 se redujeron las emisiones en el mundo alrededor de 40 Mt CO₂ – eq que equivalen al 51.3% del total, considerando que, las de unidades eléctricas representaron emisiones por 38 Mt CO₂ – eq y las emisiones de los ICE produjeron 78 Mt CO₂ – eq [1]. Según [1], las emisiones de la flota de EV se obtuvieron multiplicando el consumo de electricidad por la intensidad promedio de CO₂ de la generación de electricidad en cada país, mientras que las emisiones evitadas se determinaron como el CO₂ que se habría emitido si la flota de EV fuera impulsada por vehículos ICE con una economía de combustible representativa del promedio del país. Tal como se evidencia en la figura 2.9, la flota de EV en China es el principal contribuyente para esta reducción, ya que solo en ese país, se redujeron 30 Mt CO₂ – eq en el año 2018, es decir, 75% del total, lo que demuestra la importancia de la adopción de esta tecnología, principalmente de unidades de 2 y 3 ruedas (*two/three-wheelers*), autobuses y minibuses (*buses*), automóviles y vehículos de carga liviana (*light-duty vehicles*) respectivamente [1].

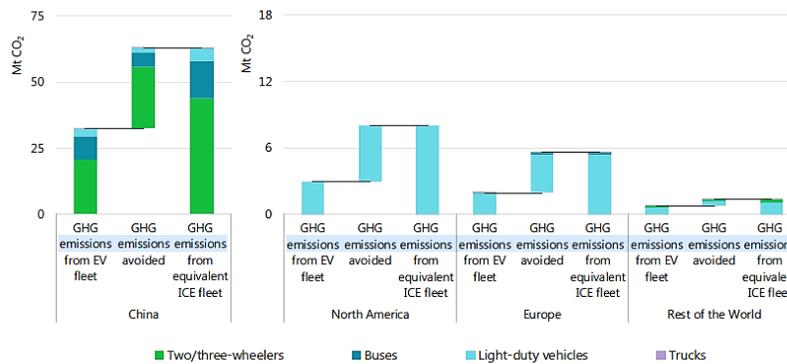


Figura 2.9. Emisiones de GEI evitadas por los EV en relación a los IEC en el mundo. Fuente: Global EV Outlook 2019. Scaling-up the transition to electric mobility [1].

- Reduce la contaminación acústica del tráfico hasta un 80% en la zona urbana de las ciudades [14].
- Mayor eficiencia energética ya que un EV aprovecha aproximadamente un 60% de la energía almacenada en las baterías para su funcionamiento que es 3 veces más en relación a un ICE que apenas aprovecha un 20% [14].
- Reducción de la demanda y ahorro en el consumo de combustibles fósiles, principalmente en el sector transporte, que proyecta para el año 2030 una reducción de 127 Mtoe, es decir, 2.5 Mb/d [1].
- Ahorro en mantenimiento mecánico ya que no dispone de elementos como aceites, filtros, refrigerantes, bandas, bujías, etc., que necesitan ser reemplazados con cierta periodicidad.
- Mayor fiabilidad por su mayor simplicidad y menor cantidad de partes mecánicas móviles que sufren menos desgaste como los frenos ya que aprovechan el freno regenerativo del motor eléctrico.

Sin embargo, las principales desventajas que se discuten en torno a la masificación de los EV tienen relación con:

- Las altas emisiones y contaminación que se generan durante el proceso de fabricación de los EV, principalmente de las baterías.
- Provoca el fenómeno denominado rango de ansiedad o “ansiedad de carga” en ciertos



usuarios, es decir, el temor a quedarse sin energía en medio de su recorrido, ya que estos vehículos fueron concebidos en sus inicios para la movilidad urbana, pero que en la actualidad las necesidades de movilidad van más allá del perímetro urbano. Este inconveniente se está superando gracias a las baterías de ion de litio que cada vez ofrecen una mayor autonomía a un costo relativamente moderado, además de la masificación de la infraestructura de carga. [10].

- Se requiere la instalación de suficiente y aún costosa infraestructura pública o privada de carga rápida o electrolineras en puntos clave de las ciudades y vías estatales para el abastecimiento energético de los vehículos cuando se requiera y cubrir la necesidad de movilidad sin importar la distancia y el destino de los usuarios. Los costos dependen del tipo de nivel de carga, así tenemos electrolineras que van desde los USD 500.00 (estaciones de carga lenta) hasta los USD 49,500.00 (estaciones de carga rápida DC a 150 kW) [10].
- Su costo es todavía relativamente alto en comparación con los ICE de las mismas características debido al costo de componentes propios de la propulsión eléctrica, principalmente de sus baterías, que representan un incremento entre un 12% y 50% del precio final al público. Así en el 2018, el precio medio de una batería de 60 kW era de USD 15,000.00 para una autonomía de 320 km aproximadamente [10].
- Incremento en la capacidad e infraestructura de las instalaciones de generación, transporte y distribución para llevar la energía eléctrica producida hacia los centros de consumo que puede significar en algunos casos, el uso de fuentes de energía no renovables para abastecer la demanda energética de las baterías de los vehículos. Así, solo en el año 2018, los 5.2 millones de EV en el mundo consumieron alrededor de 58 TWh de energía eléctrica para su funcionamiento [1].

2.3. Evolución y desafíos de la Electromovilidad

La movilidad eléctrica a nivel mundial crece de una forma acelerada. En el año 2018 el número de EV excedía los 5 millones, dos millones más que el año anterior y esta cifra sigue en



crecimiento exponencial hacia el año 2025 [1], dado que en los últimos dos años, los principales fabricantes automotrices, como BMW, Volvo, Grupo VW, General Motors, Renault-Nissan, y Toyota entre otros han anunciado planes estratégicos de conversión de su producción a productos de tecnología eléctrica como los vehículos PHEV y EV, debido a su creciente demanda [10]. Es un hecho que a medida que el mercado de EV alcance mayor masificación, sus costos de producción disminuirán conforme se logre un nivel de economías de escala suficiente, a tal punto que sus costos de producción, y por ende los precios de venta al público sean competitivos frente a los precios de los ICE, momento en el cual la renovación de la flota vehicular a nivel mundial hacia la motorización eléctrica adquirirá su máxima aceleración.

La tendencia a la baja en los costos de producción de los EV va a estar sujeta a la caída de los costos de fabricación de las baterías y el aumento de la producción en masa de este tipo de vehículos, especialmente de los EV y PHEV, los cuales poseen baterías de mayor densidad. El costo de las baterías en el 2017 fue de USD 300/kWh, y se espera que para 2025 ronde los USD 100/kWh [10]. Otro aspecto importante a considerar en el mercado de los EV es la infraestructura de carga que en la actualidad es escasa y costosa. Sin embargo, las instituciones como el BID por ejemplo, en conjunto con gobiernos nacionales y locales, proponen modelos de negocios y mecanismos de financiamiento adecuados para hacer competitiva la tecnología eléctrica en la movilidad frente a la tecnología de carbono convencional. Estos mecanismos en un principio proponen financiar una parte de la infraestructura de carga para su desarrollo hasta que la tecnología alcance su madurez y pueda sostenerse y masificarse en el tiempo y convertirse en una solución eficiente y sostenible [15].

Además, las empresas de energía locales no están dispuestas a asumir los altos costos que este tipo de infraestructura representa, convirtiéndose en un factor determinante a la hora de potenciar su utilización. Así se espera que para el 2025 sus costos disminuyan en un 40%, contribuyendo a su implementación y masificación siempre y cuando se incremente el mercado de vehículos eléctricos [10]. Por otro lado, distintos países de la región han dado los primeros pasos en sentar las bases de una infraestructura de carga y proyectos de corredores viales verdes para EV. Así por ejemplo México cuenta con la mayor red de electrolineras con más de 900 estaciones ubicadas en distintas ciudades y Uruguay con su Ruta Eléctrica [10].



La demanda de electricidad proyectada para la recarga de EV es otro de los desafíos actuales y a futuro de la masificación de la electromovilidad. Una carga no controlada, se podría generar un innecesario y desmedido incremento de la generación de potencia máxima y la capacidad de transmisión, causando inestabilidad de los sistemas eléctricos y pérdida de la calidad de la energía suministrada. Es por ello que se vuelve necesario comprender y evaluar en qué medida los sistemas de energía pueden verse afectados por el impacto de los perfiles de carga diario, y el nivel de potencia comúnmente utilizado para la recarga de los EV. Las estaciones de carga lenta que en su mayoría son privadas, representando un consumo de más del 60% de la energía total considerada para la carga de EV a nivel global [1], resultando beneficioso en la operación y gestión de los sistemas eléctricos. No así las estaciones de carga rápida que son públicas en su mayoría, y que deberían operar en períodos del día cuando la demanda es menor, como en la noche, para mitigar y controlar el crecimiento desmedido en horas pico de la demanda de energía. El desafío de la incorporación de la electromovilidad a la demanda energética, consiste en controlar la carga para una adecuada planificación y flexibilidad en la operación y expansión de los sistemas eléctricos y contribuir a un uso racional y responsable de la energía eléctrica, planteando a la electromovilidad como una estrategia de uso soberano de producción eléctrica renovable a cambio de disminuir la cantidad de importación de combustibles fósiles.

Esta característica y propiedad de la carga controlada de las baterías tiene implicaciones positivas para la red eléctrica. La energía almacenada puede utilizarse para otros fines que no sean la alimentación de los vehículos, como por ejemplo en el aporte de energía renovable o consumo de energía para minimizar los impactos en los perfiles de carga. El suministro de energía en horas pico para suplir la demanda faltante y absorber energía en horas de baja demanda ayuda a aplanar la curva de carga. Además de contribuir a la solución de problemas de estabilidad de la red, ya que los EV tienen potencial para proporcionar una respuesta a la demanda a muy corto plazo cuando sea necesario, principalmente cuando se requiere respuestas muy rápidas y precisas a las señales para realizar el control de frecuencia de la red. En base a estas observaciones, los mercados eléctricos deberían evolucionar hacia la consideración de los EV como un agente que facilite la provisión de servicios auxiliares para la estabilidad de la red y permita la participación en la respuesta a la demanda de pequeñas cargas a través de agregadores [1].



El sector transporte espera una transición tecnológica importante con la revolución de la electromovilidad. Un primer paso ha sido la elaboración de marcos normativos de fomento a la electromovilidad mediante leyes, regulaciones e incentivos fiscales y económicos a la oferta. Así un buen número de países en la región y el mundo han planteado algún sistema de incentivos de este tipo como, exenciones arancelarias y de impuestos al valor agregado, IVA, u otros impuestos internos con la finalidad de masificar la adopción de esta tecnología. Sin embargo, los subsidios a los combustibles en el país es otro de los principales motivos para el estancamiento de la electromovilidad. Para incentivar la electromovilidad los gobiernos deberán plantear alternativas para la reducción del consumo de combustibles fósiles hacia la descarbonización de su economía. Asimismo, se ha empezado a adoptar por parte de los gobiernos nacionales y locales un sistema de movilidad integral basado en taxis eléctricos, la renovación de su flota de buses por unidades también de tracción eléctrica, así como la introducción de soluciones de movilidad inteligente de “última milla” [10].

Como se evidencia en esta sección, existen muchos desafíos aún para la adopción de la electromovilidad como un mecanismo de protección ambiental, desarrollo económico y social, replanteo de la matriz energética y movilidad sostenible. Pero se están dando ya los primeros indicios en todo el mundo hacia una transición acelerada. Una vez desarrollada y madurada la tecnología que permita ser competente frente a los ICE y acceder a este tipo de vehículos cada vez a un menor costo, sin duda los EV desplazarán a los convencionales contribuyendo a la descarbonización de la economía global mediante la reducción del consumo y explotación de combustibles fósiles y la mitigación de la contaminación ambiental causada por la combustión de los medios de transporte convencionales.

2.4. Impactos de la carga de EV y BEB en las redes de distribución

La transición hacia la electrificación del transporte sin duda puede traer enormes beneficios ambientales, de salud y económicos cuando se combina con una generación de electricidad basada en energías renovables. Sin embargo, asegurar que esta transición se realice sin problemas requiere abordar varios desafíos de integración de la red [16].



Estudios como [16], proporcionan detalles sobre el proyecto MEA (*My Electric Avenue*) que desplegó más de 200 Nissan LEAF con una batería de 24 kWh de capacidad en todo el Reino Unido, convirtiéndola en una de las pruebas de integración de EV más grandes en el mundo. Este proyecto examina los desafíos y los beneficios derivados del uso de esta tecnología en hogares de estilo europeo, en un modo de carga lenta con estaciones de carga de 3,6 kW de potencia instalados en las casas. El proyecto además estudió los aspectos técnicos asociados con la adopción de EV y sus implicaciones sociales, ambientales y económicas, y probar una solución para mitigar los impactos que pueden tener en las redes de BT compuesta de múltiples alimentadores conectados al mismo transformador de distribución. Los estudios de la red MEA determinaron la capacidad de las redes trifásicas de BT considerando varios niveles de penetración de EV en hogares dotados con una red monofásica y un solo EV, modelando los sistemas en OpenDSS. Los principales problemas detectados se presentaron en el transformador de potencia ubicado en la SE, así como también problemas térmicos en los alimentadores de BT debido al incremento de la manda generado por la carga de los EV. Además, se determinó que solo los alimentadores largos pueden enfrentar problemas de voltaje para niveles muy altos de penetración de EV.

Otro estudio como el presentado en [17], indica que la descontrolada penetración de EV puede tener efectos negativos en las redes de distribución residenciales si no existe un control adecuado de su carga. Es por ello que se hace indispensable proponer métodos de carga/descarga de acuerdo a las necesidades y exigencias de los usuarios y empresas de distribución para garantizar la confiabilidad de los sistemas de distribución. Este estudio presenta un análisis exhaustivo de cuatro escenarios para la carga de EV desde el sistema de distribución. En primer lugar, un caso base en donde se analiza a la red de distribución sin la inserción de EV. En segundo lugar, el caso en donde no se controla la carga/descarga de EV. En tercer lugar, el caso en donde se controla la carga de EV, y un cuarto caso, un escenario donde se controla la carga/descarga de EV. Se ha seleccionado una red de distribución de LV de 400 V real ubicada en la ciudad de New Toshka, Aswan, Egipto como estudio de caso para ejecutar las simulaciones indicadas. De las simulaciones realizadas se determina que los beneficios de controlar la carga/descarga de la batería de los EV para la red eléctrica de distribución son, la mejora del perfil de voltaje, el



desplazamiento de la carga al período de menor demanda y de la descarga al período de mayor demanda para minimizar los impactos en el período de carga máxima. Los beneficios para los propietarios de EV son de acceder a la carga el EV a bajos costos y descargarlo a un mayor costo y motivar y concientizar a los usuarios a realizar este proceso en los periodos señalados.

Otro de los problemas que se presentan en las redes de distribución debido a la carga de EV es la congestión de la red, que se presenta cuando la generación o la demanda sobrepasan su capacidad instalada, resultando en problemas técnicos para la red, como, sobrecarga de los transformadores y acometidas, así como el incremento de pérdidas de potencia [18]. Como una contribución para reducir la congestión de los sistemas de distribución y minimizar de forma indirecta las pérdidas en los sistemas de distribución, Hajforoosh desarrolló un algoritmo en línea [19] para la coordinación óptima de la carga de EV, considerando las preferencias de los usuarios y las características técnicas de las redes de distribución.

Sin duda que la electrificación del transporte público además de presentar varios desafíos operativos, requiere de una integración adecuada a la red para garantizar confiabilidad en la operación del sistema. Tal es el caso de los BEB, que requieren altas potencias de carga para suplir la demanda de una flota considerable de autobuses, y que podrían complicar aún más la situación. Es así que en [20], se plantea evaluar los impactos en una red de distribución real, de tres métodos diferentes de carga de BEB mediante simulaciones implementadas en el software DIGSILENT PowerFactory. Las simulaciones se enfocan en un alimentador urbano de 4.75 km de longitud, a un nivel de 309 A, que abastecen a 270 cargas urbanas entre residenciales y comerciales. El primer escenario consiste en una carga rápida a 600 kW en cada estación de parada de la ruta, entre 8 a 13 segundos con arribos entre unidades de 10 minutos. El segundo escenario consiste en la carga rápida a 600 kW en la estación final del recorrido por 90 a 170 segundos. El tercer escenario plantea la carga lenta nocturna a 300 kW de las unidades que se abastecen de un nodo de MT específico de la red de distribución entre las 0h00 y 9h00. El número de BEB considerados para la simulación en cada ruta es de ocho con una capacidad de 700 kWh de su batería. Además, se plantean múltiples modificaciones a los escenarios de simulación, como aumentar el número de unidades y líneas comerciales de BEB, así como considerar la inclusión de energía fotovoltaica en la red de BT. Los resultados de este estudio



ofrecen una base sólida de consideraciones sobre la electrificación de las rutas de autobuses públicos. Los principales aportes muestran que la red de distribución simulada es capaz de integrar BEB sin mayores problemas en la mayoría de los escenarios planteados. Sin embargo, el estudio muestra que la carga rápida y frecuente en cada estación de parada en los escenarios uno y dos, causa una mayor simultaneidad de la carga provocando una sobrecarga de los transformadores, mayores caídas de voltaje y sobrecarga en las líneas de la red de hasta un 25%. La caída de voltaje en cada estación de parada debido a la frecuente carga rápida de corta duración en el primer escenario, provoca que se tenga que cambiar el tap de los transformadores para suplir esta deficiencia. El escenario 3 que considera la recarga lenta nocturna, se considera como una buena opción técnica ya que no sobrecarga a la red y permite una adecuada operación de la misma. Sin embargo, requiere que los buses tengan una batería de gran capacidad para operar durante todo el día con una sola carga. Además se recomienda que para cargas extra rápidas como la de los escenarios 1 y 2, este proceso se lo lleve a un nivel de MT ya que a un nivel de BT se presentan problemas de variación de los niveles de voltaje.

Sin duda, la movilidad eléctrica en el mundo crece a pasos agigantados y en todas sus formas, especialmente los sistemas de transporte masivo. Para acelerar aún más la electrificación de los sistemas de transporte individual y público, se debe desarrollar infraestructura de carga rápida a gran escala. Por ejemplo, debido a la creciente demanda de infraestructura de carga rápida en la República Federal de Alemania, su gobierno ha anunciado un programa de apoyo para dotar al país de 5,000 estaciones de carga rápida y 10,000 estaciones de carga lenta valorados en 300 millones de euros aproximadamente [21]. El estudio presentado en [21], muestra diferentes enfoques para garantizar la integración adecuada de una infraestructura de carga rápida en las redes eléctricas existentes. Se consideran lugares adecuados para colocar electrolinerías en autopistas, estaciones de transporte como terminales de transferencia, aeropuertos, aparcamientos, estaciones de servicio, y estaciones comerciales como supermercados, teatros, cines, entre otros. La instalación de infraestructura de carga rápida, especialmente de varios puntos de carga en una sola ubicación, requiere de una alta demanda de potencia máxima de la red de suministro, que puede exceder su capacidad instalada. En base a esta observación, uno de los enfoques sugiere la integración de infraestructura de carga rápida en la estructura de



suministro de los sistemas ferroviarios, que por lo general, presentan un bajo factor de utilización, aprovechando ya sea, las SE existentes, o utilizando la catenaria para suministrar energía eléctrica a las electrolineras. Las electrolineras utilizan voltaje en DC para la carga rápida, por lo que se necesita un convertidor AC-DC si se abastece desde la SE, o un convertidor DC-DC si se abastece directamente desde la catenaria, que por lo general maneja 750 VDC. Para reducir las pérdidas óhmicas, las electrolineras se abastecen preferentemente desde las SE ferroviarias en MT. El problema de tomar la carga directamente desde la catenaria para una elevada potencia, es que se puede llegar a superar el límite térmico del cable provocando que se incrementen las pérdidas y daños en su estructura. Es por ello que el autor en el presente estudio, establece que las redes de distribución en media tensión de corriente continua (MVDC) son una solución viable para integrar infraestructura de carga rápida dentro de redes de media tensión de corriente alterna, aprovechando la infraestructura eléctrica existente de baja utilización como la ferroviaria.

2.5. Incentivos y beneficios para la adquisición y uso de EV en el país

Según el Balance Energético Nacional del 2018, la matriz energética del Ecuador está conformada principalmente por fuentes energéticas no renovables que representan el 87.5% de la producción de energía primaria del país [22]. El sistema de transporte público actual constituye el sector de consumo energético de mayor demanda con el 48.8% del total de la energía disponible [22]. El Estado ecuatoriano en su afán de buscar una solución ecológica y sostenible para el cambio de su matriz energética, apuesta por una solución basada en energía eléctrica para promover el uso eficiente, racional y sostenible de la energía y reducir el consumo de combustibles fósiles. Estos incentivos pretenden el desarrollo y la masificación de la electromovilidad promulgando políticas y leyes de incentivos económicos y políticas de eficiencia energética. Como evidencia de estos beneficios fiscales que el estado propone para masificar la electromovilidad tenemos:



- La “*Ley Orgánica para el Fomento Productivo, Atracción de Inversiones, Generación de Empleo, y Estabilidad y Equilibrio Fiscal*” [23], expedida el 21 de agosto de 2018, exonera del impuesto al valor agregado (IVA 0%), impuestos aduaneros y a consumos especiales a vehículos híbridos y eléctricos para uso particular, transporte público y de carga, y sus implementos como baterías y estaciones de carga (electrolineras), un 0% de “impuesto especial sobre consumo” a los vehículos eléctricos de pasajeros o para transporte, y la incorporación de varias unidades de tracción eléctrica al sistema de transporte público.
- La “*Ley Orgánica de Eficiencia Energética*” [6], expedida y vigente desde el 19 de marzo de 2019, de interés nacional y como política de Estado, establece el marco legal y régimen de funcionamiento del SNEE. Esta ley promueve el uso eficiente, racional y sostenible de la energía en todas sus formas, para todas las actividades de carácter público o privado, institucional y particular. En su artículo 14, se prioriza como medida de eficiencia energética en la planificación pública, la eficiencia energética en el transporte público de carga pesada y de uso logístico por medios eléctricos a través de proyectos que se podrán ejecutar como iniciativas públicas o de asociaciones público privadas. Así, el Gobierno Nacional a través de los ministerios competentes, crearán un plan de chatarrización para los vehículos de trabajo de personas naturales y del transporte público que salgan de servicio y que se reemplacen por vehículos de medio motriz eléctrico, ya que todos los vehículos que se incorporen al servicio de transporte público urbano e interparroquial, en el Ecuador continental deberán ser únicamente de tracción eléctrica. Además, la Ley plantea que los GAD dentro de sus competencias por un período de 10 años a partir de su vigencia, podrán establecer planes e incentivos de uso obligatorio de EV para el transporte público a partir del año 2025.
En su Artículo 20, se destaca que el Estado ecuatoriano favorecerá la investigación científica y el desarrollo tecnológico en el ámbito de la eficiencia energética y uso racional de la energía a nivel de universidades, escuelas politécnicas, centros de investigación, pudiendo contar con la participación de empresas nacionales que se involucren en los proyectos de investigación.



Como disposición reformativa, a continuación del artículo 43 de la Ley Orgánica de Servicio Público de Energía Eléctrica se ha incorporado el Artículo Innumerado en relación a la comercialización de electricidad para carga de vehículos. Este artículo establece que, *“el servicio de carga de EV podrá ser ofrecido por personas naturales o jurídicas habilitadas mediante la firma de un Contrato de Comercialización de Energía Eléctrica para Carga de Vehículos suscrito con las Empresas Eléctricas de Distribución, y que estará sujeto a las condiciones jurídicas y técnicas establecidas por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad ARCONEL mediante Regulación pertinente. El costo de carga será fijado por el proveedor del servicio, limitado a un valor máximo establecido por la ARCONEL en los estudios tarifarios”*.

- La *“Resolución Nro. ARCONEL 038/15”*[24], expedida el 24 de junio de 2015 por el Directorio del ARCONEL en cumplimiento al compromiso Presidencial Nro. 21898 del 11 de abril de 2014, en relación a la producción de EV y la elaboración de una propuesta técnica referente al sistema tarifario; aprobó el *“Esquema Tarifario para la introducción de los Vehículos Eléctricos en el Ecuador”*. Esta resolución da paso a la implementación de tarifas asequibles para los propietarios de este tipo de vehículos, estableciéndose una medición de energía bidireccional mediante tecnología AMI (*Advanced Metering Infrastructure*) a costo del usuario para la facturación exclusiva del consumo energético y de la potencia mensual destinada para la carga de las baterías de los vehículos a través de un suministro exclusivo para este fin.
- El *“Pliego Tarifario para las Empresas Eléctricas de Distribución”* [25], aprobado el 23 de diciembre de 2019 por el ARCONEL mediante Resolución No. 035/19, que rige el esquema tarifario del servicio público de energía eléctrica para el período enero–diciembre 2020. En su numeral 4.4.6. establece la *“Tarifa General de Bajo Voltaje con Registrador de Demanda Horaria para Vehículos Eléctricos”*, mediante un régimen de carga lenta de hasta 10 kW de potencia a un nivel de baja tensión inferior a los 600 V. En el numeral 5.6 establece la *“Tarifa General de Medio Voltaje con Registrador de demanda Horaria para las Estaciones de Carga Rápida de Vehículos Eléctricos”* el cual



se aplica para usuarios sujetos a la categoría general de MV (mayor a 600 V y hasta los 40 kV) y que utilizan la energía para la carga rápida de EV. En el numeral 6.4 la “*Tarifa General de Alto Voltaje con Registrador de demanda Horaria para las Estaciones de Carga Rápida de Vehículos Eléctricos*” que se aplica a los consumidores de energía eléctrica conectados a HV (mayor a 40 kV y hasta 138 kV), que se enfocan en el uso de la energía para estaciones de carga rápida de EV.

A estos consumidores se le aplica la estructura y nivel tarifario correspondiente a la tarifa indicada considerando los periodos de demanda punta (18h00 a 22h00), media (08h00 a 18h00) y base (22h00 a 08h00), con el objetivo de generar incentivos para que la carga de EV en el período de demanda base o bajo consumo. Estas tarifas se aplican para la facturación mensual del servicio público de energía eléctrica, por la demanda de potencia y por el consumo de energía eléctrica, exclusivamente, del EV; medidos por un registrador de demanda horaria independiente. En este esquema tarifario, los usuarios de las diferentes tarifas en LV, MV o HV deberán pagar los siguientes cargos que se definen en la tabla 2.1:

- a) Un cargo por comercialización (USD/consumidor-mes) independiente del consumo de energía.
- b) Un cargo por demanda (USD/kW-mes en bajo voltaje) por cada kW de demanda mensual facturable como mínimo de pago independiente del consumo de energía, multiplicado por un FGDVE de 0.60 si la demanda se registra en los períodos de demanda base y media y 1.00 si se registra en el período de demanda punta.
- c) Un cargo por energía (USD/kWh en bajo voltaje) en función de la energía consumida en el período de demanda punta de lunes a domingo.
- d) Un cargo por energía (USD/kWh) en función de la energía consumida en el período de demanda media de lunes a viernes; equivalente al 80% del cargo en el periodo de punta.
- e) Un cargo por energía (USD/kWh), en función de la energía consumida en el período de demanda de base de lunes a domingo y de demanda media los días sábado y domingo; equivalente al 50% del cargo en el periodo de punta.



Tabla 2.1. Cargos Tarifarios únicos para la Carga de EV.

Fuente: Pliego Tarifario para las Empresas Eléctricas de Distribución. Período enero-diciembre 2020 [25].

Nivel de Voltaje	Período de Demanda	Demanda [USD/kW]	Energía [USD/kWh]	Comercialización [USD]
BAJO	media (lunes a viernes)	4.05	0.08	1.414
	punta (lunes a domingo)		0.1	
	base (lunes a domingo)		0.05	
	media (sábado y domingo)			
MEDIO	media (lunes a viernes)	4.05	0.069	1.414
	punta (lunes a domingo)		0.086	
	base (lunes a domingo)		0.043	
	media (sábado y domingo)			
ALTO	media (lunes a viernes)	4.05	0.069	1.414
	punta (lunes a domingo)		0.086	
	base (lunes a domingo)		0.043	
	media (sábado y domingo)			

2.6. Recarga de los EV y BEB

Al momento de elegir el tipo y la infraestructura de carga denominada “Estación de Carga” o “Electrolinera” para un determinado EV, hay 3 características fundamentales que se deben considerar, como el nivel de potencia, el tipo de conector a usar y el modo de carga relacionado con el tipo de comunicación entre el vehículo y su estación de carga [1].

2.6.1. Niveles y Tipos Carga:

La carga de los EV y PHEV se clasifican en cuatro niveles según [26]:

- Carga Súper Lenta (Nivel 1):** Compuesto por elementos como el de la figura 2.10. Este tipo de carga se la realiza mediante una toma de AC estándar monofásico en BT a 120 VCA y una potencia de máximo 2.3 kW disponible en lugares privados únicamente. No requiere de instalaciones eléctricas especiales para la protección y control de carga y

prácticamente todos los EV disponibles en el mercado vienen con un cable para este tipo de carga. El tiempo de carga promedio oscila entre 10 y 24 horas.

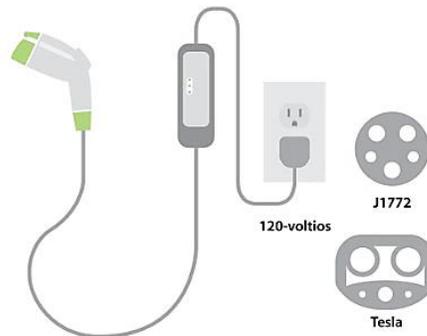


Figura 2.10. Elementos de un cargador Nivel 1.

Fuente: <https://cleanvehiclerebate.org/es/ev/technology/fueling/electric>

b) **Carga Lenta (Nivel 2):** Este tipo de carga cuyos elementos se presentan en la figura 2.11, se encuentra tanto en lugares públicos como privados. Se la realiza en AC a un nivel de tensión de 208 VCA o 240 VCA, una potencia de carga que oscila entre los 3.3 kW y los 3.7 kW. Por lo general, requieren de una instalación especial, principalmente de elementos de protección, ya que al ser mayor la demanda de energía, el cable del cargador no puede ser enchufado directamente a la toma al incorporarse el control de carga para seleccionar su velocidad. El tiempo de carga promedio oscila alrededor de las 8 horas.

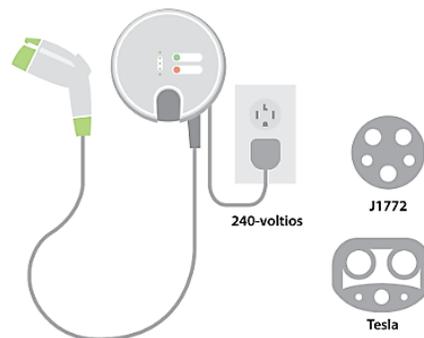


Figura 2.11. Esquema de un cargador Nivel 2.

Fuente: <https://cleanvehiclerebate.org/es/ev/technology/fueling/electric>

c) **Carga Semi-Rápida (Nivel 3):** La carga semi-rápida se la realizar en AC trifásica a 480

VCA y a una potencia de 22 kW y tomando alrededor de 1 y 2 horas para completar la carga. Este tipo de cargas es ideal tanto para lugares públicos como privados. La conexión a la electrolinera se realiza mediante un cable especial dotado de un control inteligente que gestiona la seguridad y el proceso de carga del EV.

- d) **Carga Rápida (Nivel 4):** La carga rápida se la realiza en DC, ya que el convertidor AC/DC se encuentra en la electrolinera y que es la más rápida disponible en el mercado. Su estructura física se observa en la figura 2.12, de donde se distingue que utiliza un cargador que opera inicialmente hasta 500 VDC y hoy en día se está alcanzando los 1,000 VDC y una potencia entre los 44 kW y 50 kW, recargando la batería de un vehículo en un lapso menor a los 30 minutos. En la actualidad el protocolo de carga CHAdeMO 3.0 permite la carga de cualquier tipo de EV con potencias que van desde los 6 kW hasta los 400 kW, proyectándose para este año 2020 a una carga con una potencia de 900 kW [27]. Este tipo de carga debido a la infraestructura de protección y de gestión de la carga que requiere la electrolinera, se instala únicamente en lugares públicos y en vías estatales.

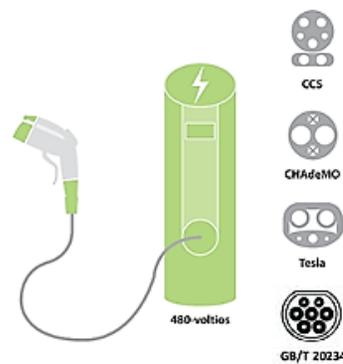


Figura 2.12. Esquema de un cargador Nivel 4.

Fuente: <https://cleanvehiclerebate.org/es/ev/technology/fueling/electric>

2.6.2. Modos de Carga:

El modo de recarga de un EV tiene relación con el tipo de comunicación entre el vehículo y la estación de carga, ya que se desea conocer si el vehículo está cargando, cual es el estado de carga (SOC) de la batería y posibles errores en el proceso. Así tenemos según [26] cuatro modos de carga:



- a) **Modo 1:** Cuando no existe ningún tipo de comunicación entre el vehículo y el cargador, que en este caso es la red de energía eléctrica.
- b) **Modo 2:** Cuando existe una comunicación básica entre el vehículo y el cargador, generalmente para indicar el estado de conexión.
- c) **Modo 3:** Cuando existe un alto nivel de comunicación entre el vehículo y el cargador, principalmente para el control de la carga de tal forma que esta sea segura evitando el deterioro de la batería.
- d) **Modo 4:** También corresponde a un alto nivel de comunicación entre el vehículo y el cargador con la diferencia de que permite gestionar la carga a una mayor potencia en relación al anterior y en DC dadas la característica del nivel de carga al cual se efectúa.

2.6.3. Tipos de Conectores:

Según [26], podemos encontrar actualmente en el mercado 8 tipos de conectores para una determinada potencia, nivel y modo de carga de los EV y PHEV. Los conectores que encontramos comercialmente son:

- a) **Conector Schuko (Tipo F):** Utilizado prácticamente en Europa para un nivel 1 y 2 y modo 1 de carga.
- b) **Conector SAE J1772 (Tipo 1):** Aceptado en Europa y Japón basado en un estándar norteamericano para un nivel 2 y 3 y un modo 1, 2 y 3.
- c) **Conector Mennekes o IEC 62196 (Tipo 2):** De origen alemán. Este conector admite varios tipos de carga para niveles 1, 2 y 3 y modos 2, 3 y 4.
- d) **Conector único combinado o CCS Combo 1:** Desarrollado por fabricantes alemanes y norteamericanos, buscando una solución común para los conectores tipo 1 y 2. Admite niveles 3 y 4 de carga y modos 2, 3 y 4. Consta de 7 pines entre potencia y comunicación.
- e) **Conector único combinado o CCS Combo 2:** Con las mismas especificaciones y características que el Combo 1 pero con la diferencia de que es un conector de 5 pines.
- f) **Conector CHAdeMO:** Es el conector para carga rápida de fabricantes japoneses. Consta de un total de 10 pines entre potencia y comunicación para un nivel y modo 4 de carga.
- g) **Conector GB/T 20234:** China tiene su propio conector para la carga semi-rápida y

rápida basado en el estándar 20234.3-2015. Las principales características de este conector es que se comunica con el sistema de administración de energía del vehículo a través de un protocolo de comunicaciones CAN (*Controller Access Network*) y además está equipado para cargar la batería auxiliar de LV y la batería principal de HV con un rango nominal entre 750 VDC y 1 kVDC [28].

- h) **Conector Tesla:** Este conector diseñado por la empresa Tesla y específicamente utilizado en Norteamérica, es capaz de manejar la carga lenta en AC y rápida en DC. La máxima potencia de carga con este conector está alrededor de 17.2 kW a un nivel de 240 VAC [28].

En la figura 2.13, se presenta un resumen de las características y especificaciones técnicas de los tipos de conectores descritos:

Charging Level	Voltage Level	Maximum Power (kW)	Charging Time	China	Europe	Japan	North America
Level 1 (Slow)	120 VAC	3.7	10–15 hrs	Private outlets (not specific for EVSE)			SAE J1772 (Type 1)
Level 2 (Slow)	220 VAC	3.7–22	3.5–7 hrs	GB/T 20234 (AC)	IEC 62196 (Type 2)	SAE J1772 (Type 1)	SAE J1772 (Type 1)
	3- ϕ 480 VAC	22–43.5		GB/T 20234 (AC)	IEC 62196 (Type 2)	SAE J3068	
Level 3 (Fast)	200–600 VDC	<200	10–30 min	GB/T 20234 DC	CCS Combo 2	CHAdeMO	CCS Combo 1
		<150		Tesla and CHAdeMO			
XFC	>800	>400	~gas refuelling	CCS/CHAdeMO			

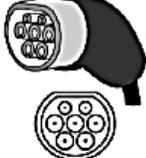
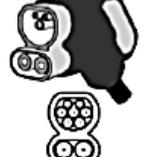
			
SAE J1772 Type 1 1 Φ 240V/7.68kW	IEC 62196-2 Type 2 3 Φ 400V/12.8kW	GB/T 20234 AC 3 Φ 380V/12.16kW	Tesla Supercharger 480V/140kW
			
GB/T 20234 DC 750V/187.5kW	CHAdeMO 500V/200kW	CCS Combo 1 600V/75kW	CCS Combo 2 1000V/200kW

Figura 2.13. Tipos de Conectores de los EV y PHEV.

Fuente: Extreme Fast Charging Technology—Prospects to Enhance Sustainable Electric Transportation [28].



2.7. Parque de EV y BEB actual en la ciudad de Cuenca

En la ciudad los vehículos FHEV y PHEV de marcas como Kia, Hyundai, Toyota-Lexus, Mitsubishi, BMW y Mercedes Benz han tenido una mayor acogida en los últimos años debido a su valor comercial competente frente a los ICE y un ahorro en el consumo de combustibles que representa este tipo de tecnología. En relación a los BEB en donde su demanda es aún reducida, la oferta la cubren únicamente los fabricantes BYD y KIA. Sin embargo, hay una gran expectativa en el sector de que se amplíe y diversifique la oferta y variedad de EV en el corto plazo, así como su demanda aprovechando los incentivos a la electromovilidad que el Estado Ecuatoriano propone.

Según el diario el Tiempo de la ciudad de Cuenca, en su redacción del 26 de noviembre de 2019, indica que *“no hay una cifra exacta de cuántos vehículos de tracción 100% eléctrica circulan en la ciudad. Así mientras la Empresa de Movilidad de la ciudad EMOV EP, asegura que son alrededor de 20 unidades, la AEADE detalla que, de los 441 EV a nivel nacional, un 10% circula en Cuenca, es decir, 44 unidades”*.

En relación al sistema integral de transporte público de la ciudad, en la actualidad no cuenta con unidades de tracción eléctrica ya sea como unidades de taxi o autobuses, sin embargo, en un futuro muy cercano, se espera que la flota actual de autobuses se renueve por unidades eléctricas mediante apoyo del GAD y del Gobierno Nacional a través de su Ley Orgánica de Eficiencia Energética y de Fomento Productivo.

2.8. Infraestructura de carga actual en la ciudad

En el Ecuador ningún actor de carácter público o privado se ha posicionado como pionero o propulsor de un plan de instalación de infraestructura de carga para EV a nivel nacional. En este sentido, se espera que la nueva Ley de Fomento Productivo impulse la importación de baterías y electrolineras. A la fecha han sido las empresas KIA y BYD que, basadas en estrategias de marketing para el posicionamiento de sus marcas, han asumido el compromiso instalando

infraestructura de carga pública en ciudades del país como Quito, Guayaquil y Loja principalmente, para cumplir con la demanda de la creciente flota de EV especialmente en el sector de la transportación [10].

Actualmente en la ciudad, gracias a la gestión e impulso de investigadores del Laboratorio de Microrredes de la Universidad de Cuenca, existe una estación de carga pública instalada en el parqueadero subterráneo del parque de la madre (figura 2.14). En esta estación se puede acceder a la carga del vehículo de forma gratuita ya que por un periodo de 6 meses a partir de su fecha de instalación (25 de noviembre de 2019) los valores generados por concepto de consumo de energía serán asumidos por la empresa de movilidad EMOV EP quien es la propietaria de la electrolinera.



Figura 2.14. Primera Estación de Carga Pública en la ciudad de Cuenca.

Fuente: <https://www.eltiempo.com.ec/noticias/cuenca/2/primera-electrolinera-publica-se-inaugura-en-cuenca>

Esta electrolinera es una estación de carga lenta provista de un conector con estándar SAE-J1772, que mediante accesorios adicionales se puede convertir el conector para facilitar la conexión de vehículos que tengan el estándar Mennekes (Europeo) o GB/T-AC (Chino). La estación se conecta a un nivel de tensión de 220VCA, pudiendo entregar una potencia de hasta 7.04kW o 32 A como máximo. Cuenta con equipos de protección para brindar seguridad al usuario al momento de la carga y un registrador de energía Siemens-Sentron PAC 3000 incorporado en el equipo que permite tener la información en tiempo real del proceso. Fue desarrollado y construido por iniciativa de los estudiantes de la carrera de ingeniería eléctrica de la Universidad Católica de Cuenca y la cooperación del Laboratorio de Microrredes de la Universidad de Cuenca.



En el ámbito privado, se tiene una estación de carga modelo Mennekes AMTRON® xtra, para motos y EV de propiedad de la Universidad Politécnica Salesiana que se alimenta a partir de un sistema fotovoltaico de 13.2 kW colocado en las instalaciones de la institución educativa [29]. La primera estación de carga rápida de propiedad del fabricante Hyundai y localizada en el Laboratorio de Microrredes de la Universidad de Cuenca (figura 2.14), dispone de 3 conectores para el suministro de energía para los estándares conector único combinado CCS combos 1 y 2, CHAdeMO y Mennekes con la finalidad de recargar EV sin importar su marca. Esta electrolinería se abastece energéticamente de la red pública de energía eléctrica a través de un transformador marca Inatra de 100 kVA de capacidad y tensión nominal de 440/254 VCA, proporcionando una potencia de carga de 50 kW a un nivel de tensión de 380 VCA.



*Figura 2.15. Estación de Carga Rápida del Laboratorio de Microrred de la Universidad de Cuenca.
Fuente: Propia del autor.*



3. El sistema de movilidad y transporte en la ciudad de Cuenca

3.1. Introducción

En este capítulo se describe la composición de la movilidad en la ciudad de Cuenca y las principales intervenciones realizadas desde la alcaldía hacia una movilidad eficiente y sostenible, teniendo como integrador principal de la movilidad al tranvía de la ciudad de Cuenca. Se determina la preferencia y frecuencia de uso de los medios de transporte público de acuerdo al Plan de Movilidad de Cuenca 2015 – 2025 y se establece un índice de motorización en la ciudad. Además, se analizan los medios de transporte público actuales que prestan su servicio comercial en la ciudad, incluyendo al tranvía; su tecnología, la cantidad de unidades que conforman su flota, descripción de las rutas comerciales y cantidad de usuarios promedio transportados al día.

3.2. Antecedentes de la movilidad y transportación en la ciudad

La movilidad en la ciudad de Cuenca depende básicamente de la oferta de todos los medios de transportes disponibles, ya sean públicos, privados, motorizados y no motorizados, y de la demanda en relación de las necesidades de los ciudadanos por trabajo, estudio, compras, gestiones personales, salud, recreación, etc [30]. Si bien se han diseñado modelos de gestión urbana en el marco de un PMEP que recoge las principales características actuales del sistema de movilidad en la ciudad con el propósito de optimizar los recursos y la configuración del sistema de transporte público hacia una movilidad sostenible, se han llevado a cabo importantes intervenciones estructurales en beneficio de la movilidad en la ciudad. Las principales intervenciones corresponden a la construcción del tranvía, habilitación de ciclovías (proyecto “Red Urbana de Ciclovías”) y la implementación de la bicicleta pública (proyecto “Bicicletas



Públicas para Cuenca”). Estos proyectos se encuentran actualmente en un proceso de adaptación en el marco de un nuevo programa de transportes basados en el tranvía que debe estructurar la dinámica de movilidad de una ciudad como articulador de una red de transporte colectivo de carácter público [30]. Según la encuesta de percepción publicada en [30], los medios de transporte preferidos por los usuarios en la ciudad son el autobús (43.1%) y el auto particular (35.9%). Seguidos en menor grado por el desplazamiento a pie (15.9%), y con menor aceptación los desplazamientos en bicicleta (1.6%), en moto (1.7%) y el taxi (1.9%). Estos resultados se pueden apreciar en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Prioridad de Movilización de los distintos medios de Transporte
Fuente: Encuesta de Percepción. Plan de Movilidad de Cuenca 2015-2025 [30].

MEDIO	PRIORIDAD				
	1	2	3	4	5
Peatón	15.9%	28.7%	27.8%	19.1%	
Bicicleta	1.6%	6.5%	9.1%	10.6%	33.3%
Auto	35.9%	15.5%	15.7%	19.1%	
Bus	43.1%	30.0%	18.1%	8.5%	
Taxi	1.9%	18.0%	26.3%	38.3%	66.7%
Moto	1.7%	1.3%	3.0%	4.3%	
TOTAL	100%	100%	100%	100%	100%

De la misma encuesta publicada en [30] y cuyos resultados se aprecian en la tabla 3.2, la frecuencia de uso de las modalidades de transporte entre los usuarios se debe principalmente a los peatones (24%), usuarios de auto particular (31%) y bus (39%) de forma diaria. Los usuarios de bicicleta lo utilizan algunas veces a la semana y ocasionalmente (9%). El taxi se utiliza ocasionalmente (47%) y alguna vez al mes (37%). La moto ocasionalmente y alguna vez al mes (4%).

Tabla 3.2. Frecuencia de Uso de los distintos medios de Transporte
Fuente: Encuesta de Percepción. Plan de Movilidad de Cuenca 2015-2025 [30].

MEDIO	FRECUENCIA DE USO			
	Todos o casi todos los días	Algunas veces a la semana	Alguna vez al mes	Ocasionalmente
Peatón	24%	24%	15%	11%
Bicicleta	2%	9%	6%	9%
Auto	31%	22%	14%	12%
Bus	39%	30%	24%	17%
Taxi	2%	13%	37%	47%
Moto	2%	2%	4%	4%
TOTAL	100%	100%	100%	100%

De acuerdo a los resultados obtenidos de las encuestas, se puede plantear una jerarquía como la que se aprecia en la figura 3.1, al momento de comparar la preferencia y frecuencia de uso de las distintas modalidades de transporte y establecer índices de motorización en la ciudad. Así, considerando aquellas opciones como primera y segunda prioridad con una frecuencia de uso de todos o casi todos los días y en orden descendente tendríamos al autobús como el mayor índice de motorización (30%) y mayor influencia desde el punto de vista económico y social, seguido muy de cerca por el auto particular (25%) y el peatón (23%) y un poco más distante el taxi (14%), la bicicleta (6%) y por último la moto (2%). Sin embargo, dado el importante crecimiento anual del parque automotor de la ciudad y el valor del índice de motorización muy cercano al del bus, en los próximos años el vehículo particular puede convertirse el medio de transporte con el mayor índice de motorización relegando al bus como una segunda opción.

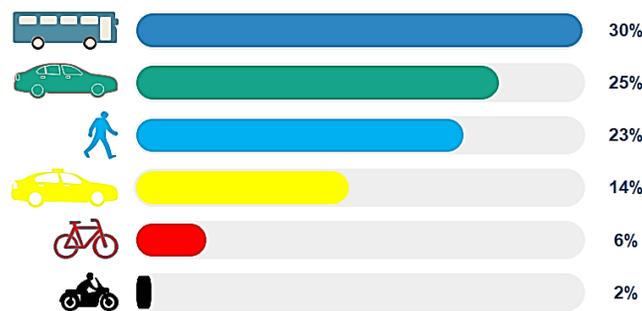


Figura 3.1. Índices de Motorización en la Ciudad de Cuenca.
Fuente: Plan de Movilidad de Cuenca 2015-2025 [30].

A pesar de que el auto particular representa un elevado índice de motorización en la ciudad impulsado preferentemente por comodidad y rapidez, existe una importante disposición entre los usuarios para dejarlo y optar por otro medio de transporte como el autobús, la bicicleta y la caminata, motivados principalmente por mejorar o mantener su salud, evitar problemas con el tráfico y ahorro económico. En base al modelo de Movilidad que se desea implementar en la ciudad, se plantean estrategias para racionalizar y priorizar el uso del auto privado y reducirlo un 10% en los próximos 10 años [30].

De forma general, se evidencia que la movilidad en la ciudad de Cuenca está fuertemente ligada con la transportación motorizada como el autobús y el auto particular, relegando a un segundo plano los otros tipos de transportación como la caminata y la bicicleta utilizados con fines

relacionados con el deporte y placer. Existe una fuerte percepción de la ciudadanía de que existen muchos autos en circulación que causan ruido e inconvenientes al tráfico y ambiente de la ciudad. Desde el enfoque que se pretende dar a la siguiente investigación, se hará referencia a los medios de transporte motorizados ya que representan el principal modo de transporte en la ciudad.

Del plan de movilidad [30] cuyos resultados se muestran en la figura 3.2, se desprende que la composición del tráfico motorizado en la ciudad está determinada por vehículos livianos en un 90%, buses de transporte público urbano y cantonal con un 3%, camiones y vehículos de carga con un 4% y motos con el 3% del total. El mayor nivel de saturación vehicular principalmente en horas pico se presentan en la mayoría de las vías del centro histórico, que es donde se concentra un importante movimiento comercial y de gestión.

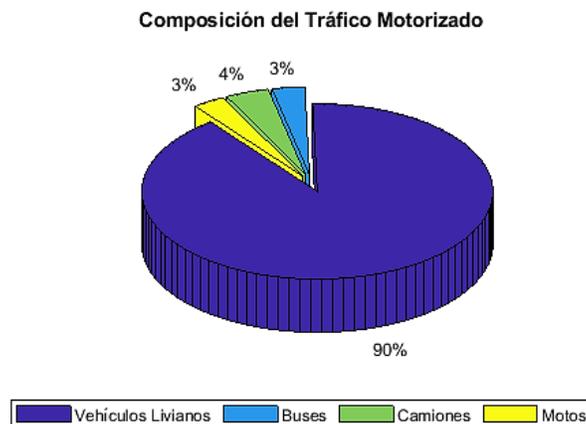


Figura 3.2. Composición del Tráfico Motorizado en la Ciudad.
Fuente: Plan de Movilidad de Cuenca 2015-2025 [30].

3.3. Descripción de los medios de transporte público urbano de combustión interna existentes en la ciudad de Cuenca

3.3.1. Identificación de los medios de transporte público de combustión interna:

El sistema de transporte público de la ciudad está constituido principalmente por una flota de autobuses que es el medio de transporte de mayor influencia desde una perspectiva económica, social y ambiental, y los vehículos utilizados como taxi. La transportación mediante autobuses la



integra una flota de 475 unidades que ha sido renovada en un 8% desde el año 2013 hasta el 2019 y cubren 29 líneas de recorrido [30]. Estas líneas de transporte se combinan, por un lado, en un sistema troncalizado que atraviesa la ciudad de norte a sur con sus respectivas alimentadoras en sentido este-oeste y cuyos puntos de transferencia o intercambio con los alimentadores se encuentran en el sector de la Feria Libre y Terminal Terrestre, y por otro lado, en un sistema interno que opera también de forma radial en rutas aisladas y distribuidas en toda la ciudad con las líneas convencionales.

La transportación pública en taxi es considerada como un servicio de transporte individual puerta a puerta ya que está destinado satisfacer la demanda de movilidad que no la pueden satisfacer otros tipos de transportes ya que ofrecen personalización de sus recorridos, menores tiempos de traslado, comodidad y facilidad de acceso a los mismos. El número de taxis formales en el año 2013 ascendían a 3,553 existiendo una relación de 10 unidades por cada 1,000 habitantes y una duración de viaje promedio de 6 a 30 minutos según [30]. En la actualidad, se pretende integrar al taxi en el nuevo modelo de movilidad para satisfacer una parte de la demanda que otros medios de transporte no lo pueden hacer, incorporando paradas en áreas destinadas para los intercambiadores de transporte público, paradas destinadas para el Tranvía y en las principales zonas de atracción de la ciudad como centros comerciales, universidades, hospitales, etc.

3.3.2. Los autobuses como parte del sistema de transporte público urbano:

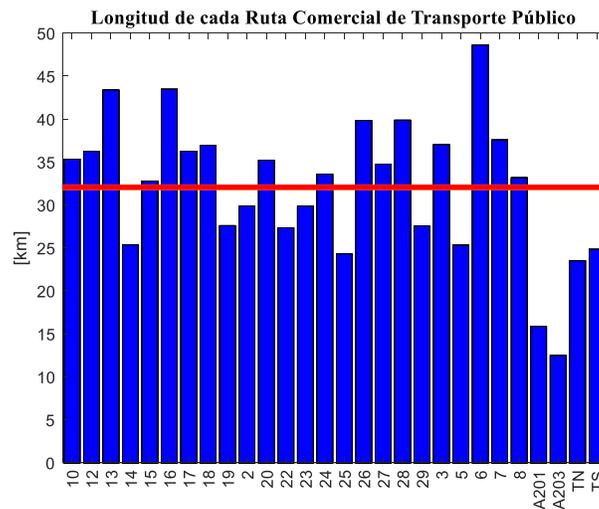
Tal como se ha identificado en la sección anterior, el autobús representa el medio de transporte público con mayor aceptación y utilización en la ciudadanía. Analizando las rutas y distancias recorridas a diario por este medio de transporte, el recorrido (ida y vuelta) y longitud de cada una de las líneas de autobuses con su respectiva frecuencia se pueden observar en la tabla 3.3, en donde el sistema de transporte público recorre en total 897.42 km por día con una frecuencia promedio de sus unidades de 9 minutos en un día laborable, un IPK de 4.2 y un recorrido medio de cada línea de 32.05 km.



Tabla 3.3. Recorrido, Longitud e IPK de cada Línea de Transporte Público.
Fuente: Plan de Movilidad y Espacios Públicos de Cuenca 2015-2025 [30].

LÍNEA	RECORRIDO	LONGITUD [Km]	FRECUENCIA [min]	IPK [pasajeros/unidad-km]
2	TOTRACOCHA-ARENAL ALTO-TOTORACOCHA	29.87	14	4
3	EL LIRIO-EUCALIPTOS-EL LIRIO	37.00	6	4.4
5	LOS ANDES-EL SALADO-LOS ANDES	25.30	6	5.8
6	MAYANCELA-TURI-MAYANCELA	48.60	15	3
7	LOS TRIGALES MALL DEL RÍO-LOS TRIGALES	37.55	5	5
8	LOS TRIGALES-SAN JOAQUÍN-LOS TRIGALES	33.15	8	4.3
10	PALUNCAY-LA FLORIDA-PALUNCAY	35.32	20	3.6
12	MINAS-QUINTA CHICA-MINAS	36.21	6	4.4
13	UCUBAMBA MALL DEL RÍO-UCUBAMBA	43.35	8	3.3
14	EL VALLE-FERIA LIBRE-EL VALLE	25.34	6	5.5
15	BAGUANCHI-FERIA LIBRE-BAGUANCHI	32.76	5	3.6
16	H DEL RÍO-SAN PEDRO-H DEL RÍO	43.45	8	4.7
17	PUNTA CORRAL-TODOS SANTOS-PUNTA CORRAL	36.23	15	2.4
18	ZONA FRANCA-AEROPUERTO-ZONA FRANCA	36.92	6	3.8
19	VISORREY-TENIS CLUB-VISORREY	27.58	10	3.8
20	RACAR-REDONDEL G. SUÁREZ-RACAR	35.18	9	3.8
22	SALESIANOS-GAPAL-SALESIANOS	27.34	5	4.5
23	YANATURO-LA FLORIDA-YANATURO	29.85	15	4.9
24	COCHAPAMBA-MIRAFLORES-COCHAPAMBA	33.56	8	3.1
25	CDLA. JAIME ROLDOS-MERCADO 27 DE FEBRERO-CDLA. JAIME ROLDOS	24.30	15	3.2
26	CHECA-MERCADO 27 DE FEBRERO-CHECA	39.81	15	5.2
27	HUIZHIL-SININCAY-HUIZHIL	34.73	10	4
28	NARANCAJ-CAPULISPAMBA-NARANCAJ	39.85	5	4.2
29	BALZAY-H DEL RÍO-BALZAY	27.55	12	3.8
Alimentador 201	FERIA LIBRE-BALZAY-FERIA LIBRE	15.84	5	4.4
Alimentador 203	TERMINAL TERRESTRE-EUCALIPTOS-TERMINAL TERRESTRE	12.46	5	3.6
Troncal Norte	RICAUARTE-TERMINAL TERRESTRE-FERIA LIBRE	23.50	5	5.9
Troncal Sur	BAÑOS-FERIA LIBRE-TERMINAL TERRESTRE	24.82	5	5.4
TOTAL		897.42	9	4.2

Como se observa en la figura 3.3, la línea 6 realiza el mayor recorrido con una longitud de 48.60 km, mientras que el Alimentador 203 realiza el menor recorrido con 12.46 km. La cantidad de líneas que realizan recorridos con una longitud superior a la media son 16 que representan el 55% del total, mientras que 13 líneas realizan recorridos con una longitud por debajo de la media representando el 45%. Se concluye que casi la mitad de las líneas del transporte público de la ciudad gastan recursos innecesariamente realizando recorridos que pueden ser cubiertos por otras líneas. Como dato relevante también se puede mencionar que, los autobuses en sus distintas rutas transportan alrededor de 318,000 pasajeros en un día laborable considerando que cada unidad tiene una capacidad para transportar 90 personas, 50 personas de pie y 40 sentadas.



*Figura 3.3. Longitud de cada ruta de Transporte Público.
Fuente: Plan de Movilidad y Espacios Públicos de Cuenca 2015-2025 [30].*

3.3.3. El taxi como medio de transporte público urbano:

La modalidad de transportación pública mediante taxi se define como un sistema de transportación que no es masiva sino más bien individual de puerta a puerta. Se presta el servicio en vehículos particulares de color amarillo organizados en operadoras legalmente constituidas y autorizadas por la Comisión Nacional de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial. El número de pasajeros que se pueden transportar en este tipo de unidades en cada viaje es de máximo 4 personas.

Según los datos del “Plan de Movilidad de Cuenca 2015-2025” [30], el número de unidades formales es de 3,553 de las cuales el 94% operan dentro de los límites urbanos, dando un aproximado de 1 unidad por cada 100 habitantes en la ciudad. La demanda de taxi presenta un perfil muy irregular a lo largo del día. Sin embargo, se presenta un pico entre las 09h00 y 12h00 vinculados con los horarios de atención de los distintos comercios, entidades públicas y privadas, hospitales y clínicas, universidades, etc. El recorrido total diario aproximado (con y sin pasajeros) de una unidad es de 350 km, de los cuales una gran cantidad corresponde a recorrido sin pasajeros.

3.4. El Sistema Tranvía de la ciudad de Cuenca

3.4.1. Antecedentes:

El tranvía de Cuenca (figura 3.4) es el primero de su clase en el Ecuador constituido como el mayor sistema de transporte público masivo en la ciudad. El monto aproximado de su construcción es de 280 millones de dólares bajo la Administración Municipal en el período 2014-2019 con un aporte del 80% por parte del Gobierno Nacional y el 20% por el GAD Municipal del Cantón Cuenca [11] y que forma parte como la columna vertebral de un Sistema Integral de Movilidad que se complementa con otros medios de transporte que pretende beneficiar a 120,000 personas al día y 39 millones al año aproximadamente.



*Figura 3.4. Tranvía de la Ciudad de Cuenca.
Fuente: <http://tranvia.cuenca.gob.ec/node/6>*

La construcción y operación del Tranvía para la Ciudad surge a partir de las necesidades identificadas en el Plan de Movilidad y Espacios Públicos de Cuenca [30] con lo que se espera reducir la congestión vehicular, la alta dependencia del vehículo particular, los niveles de contaminación ambiental y ruido excesivo. Además, se espera frenar el crecimiento de la demanda y circulación de vehículos en el perímetro urbano que crece con una tasa anual del 10% versus el 2% del crecimiento de la población. Para ese año, TM para la Ciudad de Cuenca se determinó en 1.36 vehículos por habitante [30].

3.4.2. Descripción y especificaciones del recorrido del tranvía:

La ruta del Tranvía tiene una longitud de vía doble de 10,181 m desde el PK de vía PK 0+000 hasta el PK 10+181 medidos sobre el eje de la infraestructura. Está compuesto por 3 tramos tal como se puede identificar en la figura 3.5, recorriendo la ciudad de forma diagonal por el eje suroeste a noreste, desde el Control Sur en la entrada a Baños hasta el Parque Industrial pasando por el Centro Histórico, convirtiéndose en el eje principal del transporte público complementándose con las 29 líneas de buses que recorren la ciudad.

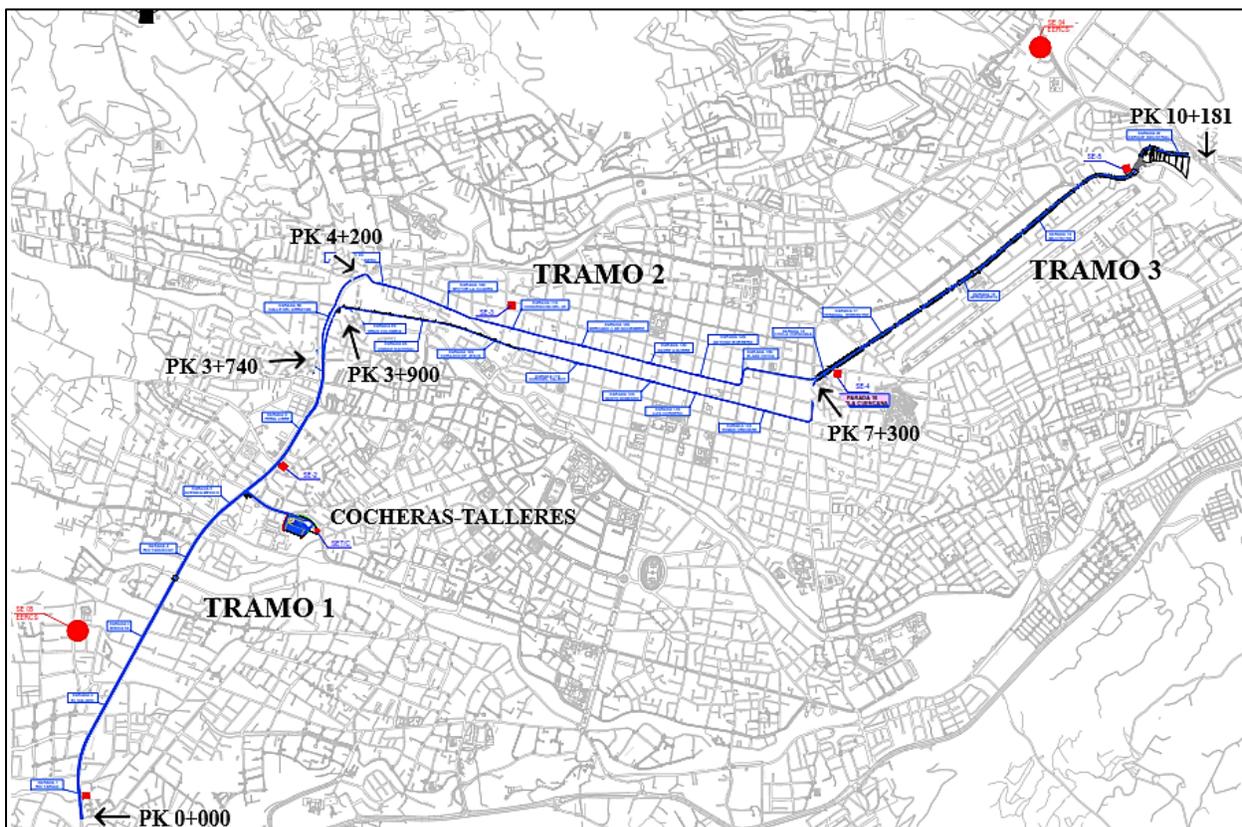


Figura 3.5. Recorrido del Tranvía de la Ciudad de Cuenca.

Fuente: “Estudios complementarios y de Ingeniería Básica de la Red Primaria de Transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de Los Cuatro Ríos”. Anexo 9. Planos [31].

Para el Tramo 1 la línea inicia en el punto de maniobra ubicada en el PK 0+000 del trazado al sur de la ciudad, en el sector del Control Sur, hasta el PK 3+900 por la vía izquierda y PK 4+200 por la vía derecha. En este tramo que recorre principalmente la Av. de las Américas las dos vías avanzan en paralelo hasta PK 3+740 y comparten las paradas para las dos vías (Norte y Sur). A



partir de este punto se produce un desdoblamiento de las vías y las paradas son individuales para cada una, además, en este tramo, se encuentra la desviación hacia las Cocheras y Talleres ubicados en el antiguo complejo del CREA justo después de la parada 5 ubicada en la Avenida México.

El Tramo 2 avanza desde el PK 3+900 para la vía izquierda en la calle Mariscal Lamar, y desde PK 4+200 para la vía derecha por la calle Gran Colombia hasta el PK 7+300. En este tramo se produce el desdoblamiento de las vías para cruzar por el centro histórico de la ciudad, por lo cual cada vía dispone de su propia parada. La electrificación de una parte del trazado es subterránea, específicamente desde el PK 4+850 en la vía derecha y PK 4+700 en la vía izquierda hasta el PK 7+300 para ambas vías.

Mientras que el Tramo 3 que recorre la Av. España, inicia en el PK 7+300 aproximadamente donde se vuelven a juntar las vías del tramo 2 hasta el PK 10+181 donde se termina la línea con el punto de maniobra en la zona noroeste de la ciudad ubicada en el Parque Industrial de la ciudad. En este tramo las dos vías avanzan en paralelo y las paradas son comunes para las dos vías.

En el trazado de la ruta del Tranvía circularán 14 unidades que transportarán entre 250 y 300 personas aproximadamente por unidad en un tiempo de 35 minutos desde la estación de Maniobra 1 en el Control Sur hasta la última en el Parque Industrial. La velocidad promedio que alcanzan las unidades es de 45 km/h, y sus recorridos tendrán una frecuencia de 10 minutos en horas regulares y 6 minutos en horas pico [32]. Sus recorridos empezarán a las 06:00 y culminarán a las 22:00 de forma continua todos los días de la semana. En la ruta podemos encontrar distribuidas 20 paradas en la vía izquierda y 19 en la vía derecha, ya que, en el tramo 1 se comparten 7 paradas, mientras que en el 3 se comparten 5 paradas para las dos vías. El recorrido y localización de las paradas del Tranvía se pueden observar en la figura 3.6, y su respectiva denominación y ubicación se describe en la tabla 3.4.



Tabla 3.4. Ubicación de las paradas del Tranvía de Cuenca.

Fuente: “Estudios complementarios y de Ingeniería Básica de la Red Primaria de Transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de Los Cuatro Ríos”[31].

Parada	Ubicación PK	Vía
Maniobra 1	PK 0+000	Norte y Sur
1 - Río Tarqui	PK 0+165	Norte y Sur
2 - El Salado	PK 0+775	Norte y Sur
3 - Misicata	PK 1+277	Norte y Sur
4 - Río Yanuncay	PK 1+864	Norte y Sur
5 - Av. México	PK 2+314	Norte y Sur
6 - Feria Libre	PK 2+977	Norte y Sur
7 - Río Tomebamba	PK 3+385	Norte y Sur
8S - Gran Colombia	PK 3+973	Sur
8N - Calle del Arrayán	PK 3+687	Norte
9S - Unidad Nacional	PK 4+362	Sur
9N - Parque del Molinero	PK 4+263	Norte
10S - Corazón de Jesús	PK 4+846	Sur
10N - Sector la Cuadra	PK 4+705	Norte
11S - Coronel Talbot	PK 5+401	Sur
11N - Convención del 45	PK 5+147	Norte
12S - Santo Domingo	PK 5+890	Sur
12N - Mercado 3 de Noviembre	PK 5+606	Norte
13S - Luis Codero	PK 6+189	Sur
13N - Padre Aguirre	PK 6+065	Norte
14S - Tomás Ordoñez	PK 6+644	Sur
14N - Antonio Borrero	PK 6+396	Norte
15N - Plaza Cívica	PK 6+690	Norte
16 - Chola Cuencana	PK 7+290	Norte y Sur
17 - Terminal Terrestre	PK 7+742	Norte y Sur
18 - Aeropuerto	PK 8+376	Norte y Sur
19 - Milchichig	PK 8+996	Norte y Sur
20 - Parque Industrial	PK 10+115	Norte y Sur

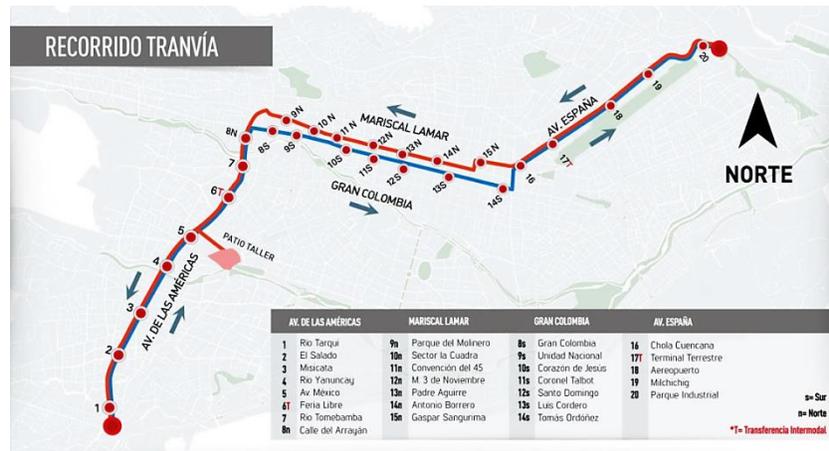


Figura 3.6. Localización de las Paradas en el Recorrido del Tranvía de la Ciudad de Cuenca.
Fuente: <http://tranvia.cuenca.gob.ec/rutas>

3.4.3. Material rodante del tranvía:

El material rodante comprende 14 unidades modelo Citadis 302 del fabricante francés Alstom. Sus dimensiones son de 32.4 m de longitud, 2.4 m de ancho y 3.3 m de alto. Está compuesto por 5 módulos, de los cuales dos corresponden a las cabinas de conducción con motor de impulso en régimen bidireccional, una góndola portadora con pantógrafo de contacto con línea aérea y dos vagones colgantes [33] tal como se observa en la figura 3.7. Cada unidad tiene una capacidad de transportar en total 300 pasajeros o 6 pasajeros/m², y las velocidades que pueden alcanzar son de 60 km/h en zonas urbanas protegidas, 20 km/h en las zonas urbanas peatonales y 40 km/h en los cruces.

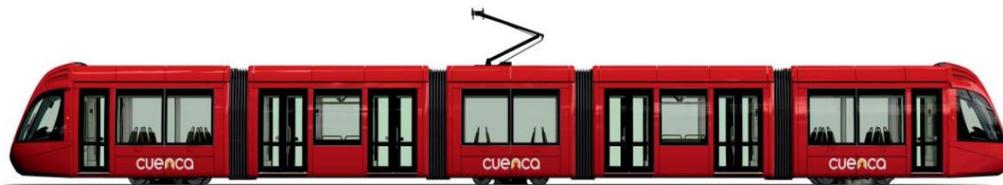


Figura 3.7. Composición de una unidad del Tranvía de Cuenca.
Fuente: CASE STUDY. Municipalidad de Cuenca. Turnkey integrated tramway system [33].

El sistema de tracción del material rodante por unidad lo conforman cuatro motores de impulsos trifásicos asíncronos con rotor jaula de ardilla de tracción ferroviaria 4 HGA 1433 con las especificaciones técnicas presentadas en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Características Técnicas de los Motores de Tracción Tranviarios.

Fuente: Modelado del Tranvía Citadis-302 Implementado en la Ciudad de Cuenca Utilizando Matlab - Simulink® [34].

CARACTERÍSTICA	VALOR
Voltaje Nominal [V]	500
Frecuencia [Hz]	88
Potencia Nominal [kW]	120
Nro. Polos	4
Velocidad Nominal [rpm]	2600

3.4.4. Líneas de alimentación del tranvía:

La alimentación eléctrica del Tranvía se da a un nivel de voltaje de 750 VDC que manejan los motores eléctricos que impulsan al material rodante de dos formas, la una mediante una catenaria o línea aérea de contacto y la otra sin línea aérea de contacto, las mismas que se describen a continuación.

3.4.4.1. Alimentación con línea aérea de contacto:

Este tipo de alimentación denominada también tecnología LAC (Línea Aérea de Contacto), se realiza a través del contacto entre el cable o línea aérea que lleva la corriente eléctrica y el pantógrafo que se encuentra encima del material rodante del tranvía permitiendo la captura de la corriente de las líneas para alimentar a los motores eléctricos que realizan la tracción. El tranvía de Cuenca cuenta con un sistema de alimentación LAC en los tramos 1 y 3 de la ruta como el de la figura 3.8.



Figura 3.8. Alimentación del Tranvía mediante tecnología LAC.

Fuente: Propia del Autor.



3.4.4.2. Alimentación sin línea aérea de contacto:

Denominado también sistema de alimentación por el suelo o tecnología APS (Alimentación Por Suelo) que impulsa al tranvía a través del contacto entre un tercer carril central entre los rieles y un patín de contacto eléctrico situado en la parte baja del material rodante que lleva la corriente eléctrica hacia los motores eléctricos. Este tipo de tecnología se encuentra instalada en el tramo 2 de la ruta tranviaria como el de la figura 3.9 que cruza el centro histórico, constituyéndose en el primer sistema de tranvías sin catenaria en América Latina, esto con la finalidad de disminuir el impacto visual de las líneas de alimentación eléctrica en la zona patrimonial de la ciudad.



Figura 3.9. Alimentación del Tranvía mediante tecnología APS.
Fuente: Propia del Autor.



4. Características técnicas del proyecto tranvía

4.1. Introducción

En este capítulo se describe las características técnicas del sistema eléctrico de alimentación del tranvía y que se tomará como base para la implementación y simulación del sistema eléctrico en el software OpenDSS. Se hace una breve descripción de la normativa eléctrica y especificaciones técnicas, tanto nacional como internacional, que rigen la construcción de sus instalaciones. Se describen los criterios técnicos considerados para el dimensionamiento y construcción del sistema eléctrico de acuerdo a las características propias del proyecto. Se presenta en detalle un esquema eléctrico general de la red eléctrica de abastecimiento energético del sistema tranviario, desde las SE de propiedad de la EERCS hasta las SE propias de tracción del sistema.

4.2. Normativa eléctrica

Las especificaciones técnicas y regulaciones que debe cumplir el proyecto Tranvía tanto en su etapa constructiva, operacional y de mantenimiento se basan en las siguientes normativas nacionales e internacionales descritas en la tabla 4.1 y referidas principalmente a sus instalaciones eléctricas y calidad de la energía [35]:

Tabla 4.1. Normativas y Regulaciones que cumple el Proyecto Tranvía.

Fuente: “Estudios complementarios y de Ingeniería Básica de la Red Primaria de Transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de Los Cuatro Ríos”. E2.05: Diseños Eléctricos. Anexo 1 [31].

Normativa	Regulación No./Norma No.	Descripción
Ecuador CONELEC	002/10	Determinación de las distancias de seguridad entre la Red Eléctrica y las Edificaciones.



	004/01	“Calidad del Servicio Eléctrico de Distribución”.
	008/11	“Prestación del Servicio de Alumbrado Público General”
Americana	NEC 2008	Reglas para instalaciones eléctricas en ocupaciones residenciales, comerciales e industriales.
Europea	EN 50 119	Aplicaciones ferroviarias: líneas de contacto aéreo de tracción eléctrica.
	EN 50 121-1	Aplicaciones ferroviarias. Compatibilidad electromagnética.
	EN 50 121-2	Aplicaciones ferroviarias. Compatibilidad electromagnética. Emisión de todo el sistema al mundo exterior.
	EN 50 121-3.1	Aplicaciones ferroviarias. Compatibilidad electromagnética. Tren de material rodante y vehículo completo.
	EN 50 121-3.2	Aplicaciones ferroviarias. Compatibilidad electromagnética. Aparatos de material rodante.
	EN 50 121-4	Aplicaciones ferroviarias. Compatibilidad electromagnética. Emisión e inmunidad del aparato de señalización y telecomunicaciones.
	EN 50 121-5	Aplicaciones ferroviarias. Compatibilidad electromagnética. Emisión e inmunidad de la instalación y el aparato de suministro de energía fijo.
	EN 50122-1	Aplicaciones ferroviarias. Disposición de protección en materia de seguridad eléctrica y puesta a tierra.
	EN 50122-2	Aplicaciones ferroviarias: disposición de protección contra el efecto de la corriente continua.
	EN 50124-1	Aplicaciones ferroviarias: requisitos básicos, espacios libres y distancias de fuga para equipos eléctricos.
	EN 50124-2	Aplicaciones ferroviarias. Sobretensión y equipos relacionados.
	EN 50124-3	Aislamiento sólido y líquido.
	EN 50126	Aplicaciones ferroviarias: especificación y demostración de la fiabilidad: fiabilidad, disponibilidad, mantenimiento y seguridad (RAMS).
	EN 50149	Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Tracción eléctrica. Cables de contacto de cobre y de aleación de cobre.
	EN 50163	Aplicaciones ferroviarias. Tensiones de alimentación de equipos de tracción.
	EN 50328	Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Convertidores electrónicos de potencia para subestaciones
	EN 50329	Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Transformadores de tracción.
	EN 60439	Conjuntos de conmutación en baja tensión. Parte 1: Conjuntos de serie y conjuntos derivados de serie.
	EN 60598	Luminarias. Parte 1: Requisitos generales y ensayos.
	Internacional	ISO/IEC 11801
IEC 1000-4-7		Establecimiento de los límites de armónicos en tensión, intensidad y efecto Flicker.
IEC 1000-3-2 y 7		
IEC 1000-4-15		
IEC 868		
IEC 60071-1	Coordinación de aislamiento. Parte 1: Definiciones, principios y reglas.	



IEC 62271-1	Conmutación en alta tensión. Parte 1: Especificaciones comunes.
IEC 62271-100	Conmutación en alta tensión. Parte 100: Breakers en CA.
IEC 62271-102	Conmutación en alta tensión. Parte 102: Seccionadores de corriente alterna e interruptores de puesta a tierra.
IEC 60265-1	Conmutación en alta tensión. Parte 103: Interruptores para tensiones nominales superiores a 1 kV hasta 52 kV inclusive.
IEC 62271-102	Conmutación en alta tensión. Parte 102: Seccionadores de corriente alterna e interruptores de puesta a tierra.
IEC - 61643 - 1:1998	Dispositivos de protección contra sobretensiones de baja tensión. Parte 1: Dispositivos de protección contra sobretensiones conectados a sistemas de distribución de energía de baja tensión. Requisitos y ensayos.
IEC 60687	Equipos de medición de electricidad (AC). Requisitos particulares. Parte 61: Requisitos de consumo de energía y voltaje.
IEEE Std C2-2007	National Electrical Safety Code – NESC - Edición 2007.
IEEE 835-1994	Tablas de capacidad de cable de alimentación.
IEEE 80-2000	Guía de seguridad en la puesta a tierra de subestaciones de CA.
IEEE Std. 81-1983	Guía para medir la resistividad de la tierra, la impedancia de tierra y los potenciales de superficie de un sistema de tierra.
IEEE Std 141-1993	Práctica recomendada por IEEE para la distribución de energía eléctrica para plantas industriales.
HD 516 S2	Guía para el uso de cables armonizados de baja tensión.

4.3. Consideraciones para el dimensionamiento de la infraestructura eléctrica del proyecto tranvía

4.3.1. Criterios de partida:

Los criterios que se han considerado para el dimensionamiento y modelado de la infraestructura eléctrica del tranvía en su etapa operativa se exponen en [31], de las cuales los más importantes son:

1. El material rodante del Tranvía lo conforman trenes de 67.5 toneladas de peso total con carga máxima de 8 viajeros por m². Para el análisis de la curva de demanda diaria de potencia más realista se ha considerado una carga media con 150 pasajeros en cada unidad en un escenario inicial de operación.



2. Frecuencias de explotación de línea de 4 minutos considerada como la más crítica de las situaciones en un escenario horizonte. En base a esta frecuencia se han dimensionado el número de SE propias, potencias, demandas y conductores de los diferentes circuitos.
3. Frecuencias de explotación de línea de 6 minutos considerado como un escenario mucho más realista que el anterior de inicio y medio plazo. En relación a esta explotación se ha dimensionado el consumo energético.
4. A efectos energéticos y de potencias, los transformadores de grupo rectificador se han dimensionado de tal forma que pueden admitir sobrecargas del 150% de su potencia nominal durante 2 horas y un 300% durante un minuto, por lo que no debería existir inconvenientes técnicos de asumir picos de demanda en los momentos de sobrecarga.

4.3.2. Potencia demandada:

Para determinar la potencia eléctrica total requerida por el tranvía para su operación en condiciones normales, se requiere analizar muchos factores complejos de predecir y controlar como el modo de conducción del maquinista y las paradas imprevistas, por ejemplo. En base a estas demandas se han realizado distintos modelamientos y simulaciones del funcionamiento del Tranvía para proyectar de una manera realista su demanda energética diaria basada en dos escenarios, uno de inicio (frecuencia de 6 minutos de las unidades) y otro de horizonte (frecuencia de 4 minutos de las unidades) considerando el posible incremento de la carga en el período de vida útil de proyecto. Considerando todos los factores anteriormente indicados y los escenarios planteados, la demanda final real del Tranvía va a depender de la consideración de las siguientes demandas:

- Tracción de Línea.
- Bloques Técnicos en las Paradas.
- Servicios Auxiliares en las SE.
- Tracción en Cocheras y Talleres.
- Instalaciones en Cocheras y Talleres.



4.3.2.1. Demanda requerida por la tracción de línea:

Para determinar la demanda debida a tracción o circulación de las unidades en línea se ha considerado un escenario de inicio con una frecuencia de 6 minutos de sus unidades y uno de horizonte con una frecuencia de 4 minutos. El criterio para el dimensionamiento es que se considere que la línea del tranvía tiene redundancia tal que, si falla uno de los grupos de alimentación, la subestación pueda seguir alimentando la catenaria sin sufrir cambio alguno. Se ha estimado que el tiempo de las unidades en paradas varía entre 20 y 25 segundos por parada, mientras que cuando existe cambio de cabina del conductor, se ha establecido un tiempo de parada de 2 minutos y medio. La frecuencia de explotación se realizará con 12 unidades circulando cada 6 minutos para el escenario de inicio y 16 unidades para un escenario horizonte con frecuencias de 4 minutos en un total de 15 horas diarias.

Se ha estimado que en el escenario de inicio la demanda por la Tracción en Línea es de 1.65 MVA y la energía total requerida diaria es de 21.34 MWh [31], mientras que en el escenario horizonte la demanda puede alcanzar 2.15 MVA y requerir 27.80 MWh de energía [31].

4.3.2.2. Demanda requerida por los bloques técnicos en las paradas:

Un bloque técnico contiene el armario en donde se ubican todos los servicios necesarios de una parada. En su interior encontramos toda la apartamenta de protección eléctrica, el transformador que alimenta energéticamente a los elementos de control de tráfico y señalización de la parada, el equipo de comunicaciones y el módulo de cobro del pasaje.

La demanda producto de los consumos eléctricos de los equipos instalados en los bloques técnicos en las distintas paradas se estima en 0.20 MVA con un consumo energético diario de 3.00 MWh para los escenarios inicial y horizonte. Estos equipos se alimentan desde las SE rectificadoras a través de una red trifásica a 480 VCA, de tal forma que no necesitarán de acometidas externas en baja tensión [31].

4.3.2.3. Demanda requerida por los servicios auxiliares en las SE:

Dentro del conjunto de equipos que conforman los servicios auxiliares de maniobra, protección, control y señalización de la SE tenemos:



- Protecciones de la línea de salida en 220 VCA.
- Analizadores de redes para el secundario del transformador.
- Circuitos de protección, maniobra y control de ventiladores, alumbrado y tomacorrientes.
- Alimentación de tomacorrientes de fuerza y relés.
- Alimentación auxiliar a 220 VCA de las celdas de CA en alta tensión y en DC.
- Alimentación de la central de incendios.
- Alimentación del equipo cargador-rectificador de baterías.
- Embarrado de 100 VDC y protecciones generales de la alimentación de circuitos de control de las celdas de CA en AT, celdas de 750 VDC y celdas de seccionamiento.
- Alimentación de los módulos de control (PLC).

La potencia debida a consumos de los equipos e instalaciones de servicios auxiliares en las SE Rectificadoras de Tracción Alimentadoras es de 0.24 MVA y un consumo de energía de 3.60 MWh diarios aproximadamente en los escenarios inicial y horizonte [31].

4.3.2.4. Demanda requerida por la tracción en cocheras y talleres:

La demanda producto de la Tracción en las instalaciones de Cocheras y Talleres es de 0.50 MVA para los escenarios de inicio y horizonte, mientras que el consumo energético diario es de 2.50 MWh para el escenario de inicio y 3.00 MWh para el de horizonte [31].

4.3.2.5. Demanda requerida por las instalaciones en cocheras y talleres:

La potencia requerida por las instalaciones en cocheras y talleres es de 0.70 MVA aproximadamente para ambos escenarios, mientras que el consumo energético es de aproximadamente 5.60 MWh para el escenario inicial y de 7.00 MWh para el de horizonte [31].

En resumen, la demanda y consumo energético diario promedio según [31] de las instalaciones eléctricas del tranvía es de 3.29 MVA y 36.24 MWh para el escenario inicial y 3.79 MVA y 44.40 MWh para el escenario horizonte, por lo que se concluye que la demanda media del proyecto Tranvía de Cuenca es de aproximadamente 4 MVA y un consumo energético diario de 45 MWh.

Esta demanda será satisfecha por las SE de Potencia de la EERCS a un nivel de Voltaje de Servicio en MT de 22 kV que alimentan a las diferentes SE de Tracción de Alimentación del



Tranvía para su posterior rectificación a DC e inyección en las Líneas de Alimentación y Catenarias. En resumen, la tabla 4.2, representa la demanda promedio diaria bajo los escenarios planteados.

Tabla 4.2. Demanda y Energía aproximada de las Instalaciones del Tranvía.

Fuente: “Estudios complementarios y de Ingeniería Básica de la Red Primaria de Transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de Los Cuatro Ríos”. E2.05: Diseños Eléctricos. Anexo 1 [31].

Instalación	Escenario Inicio		Escenario Horizonte	
	Demanda [MVA]	Energía [MWh]	Demanda [MVA]	Energía [MWh]
Tracción	1.65	21.34	2.15	27.80
Instalaciones en Paradas	0.20	3.00	0.20	3.00
Servicios Auxiliares	0.24	3.60	0.24	3.60
Tracción C/T	0.50	2.50	0.50	3.00
Instalaciones en C/T	0.70	5.60	0.70	7.00
TOTAL	3.29	36.04	3.79	44.40

4.4. Descripción y especificaciones técnicas de la infraestructura eléctrica del proyecto tranvía

Las instalaciones eléctricas disponibles para abastecer de energía eléctrica a las instalaciones de las Cocheras-Talleres, Bloques Técnicos y la Línea de Alimentación (catenaria) para la puesta en marcha del tranvía la conforman los siguientes elementos:

- 1) Acometidas trifásicas en MT a un nivel de voltaje de 22 kV desde los Alimentadores de las SE de la EERCS, que abastecen de energía a las instalaciones eléctricas del Proyecto.
- 2) SE del Tranvía que transformarán el voltaje en MT de la red de alimentación de 22kV en voltajes adecuados para cada uno de los transformadores de servicios auxiliares y de línea.
- 3) Línea de alimentación con tecnología LAC a lo largo de los tramos 1 y 3 del recorrido.
- 4) Línea de alimentación con tecnología APS en la zona del Centro Histórico Patrimonial de la ciudad correspondiente al tramo 2 del recorrido.
- 5) Red particular y equipamiento para la alimentación de los equipos eléctricos de las paradas.

- 6) Sistemas auxiliares de respaldo en SE (alumbrados y tomacorrientes, sistemas contraincendios, ventilación y climatización).

4.4.1. Acometidas en MT desde las SE de la EERCS:

Para alimentar y abastecer de energía eléctrica a las SE e instalaciones del proyecto tranvía se tienen dos acometidas trifásicas simples más neutro a un nivel de MT de 22 kV que provienen del alimentador 0528 de la SE 05 (El Arenal) y del alimentador 0428 la SE 04 (Parque Industrial) de propiedad de la EERCS. En condiciones normales de funcionamiento, la demanda total de las instalaciones del Tranvía se ha proyectado en 4 MVA [31], en donde cada SE aportará una potencia media de 2 MVA. Sin embargo, de presentarse posibles contingencias y/o la salida eventual de uno de los alimentadores, cada subestación, así como su respectiva acometida deben estar en la capacidad de abastecer el total de la demanda (4 MVA) por confiabilidad del sistema y evitar que el tranvía detenga su normal operación debido a la salida de uno de sus alimentadores.

La acometida desde la SE 04 de la EERCS tiene una longitud total de 1,300 m y realiza el recorrido que se observa en la figura 4.1 a través de las distintas calles del sector sur de la ciudad de forma subterránea, hasta su destino en la SE-05 del Tranvía.

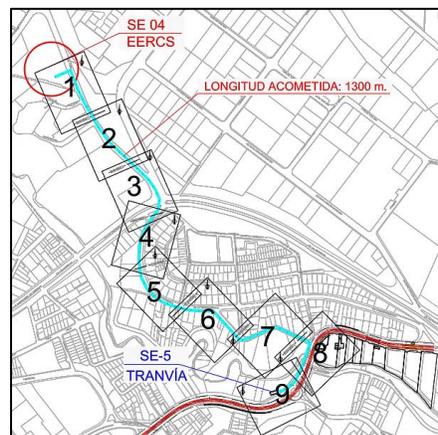


Figura 4.1. Recorrido de la Acometida desde el Alimentador 0428 hacia la SE-5.

Fuente: “Estudios complementarios y de Ingeniería Básica de la Red Primaria de Transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de Los Cuatro Ríos”. Anexo 9. Planos [31].

La acometida desde la subestación 05 (SE 05 EERCS) tiene una longitud total de 1,455 m aproximadamente y realiza el recorrido que se observa en la figura 4.2. Esta acometida también es subterránea y recorre determinadas calles del parque industrial donde se encuentra ubicada la SE de potencia hasta su destino en la SE-1 del Tranvía.

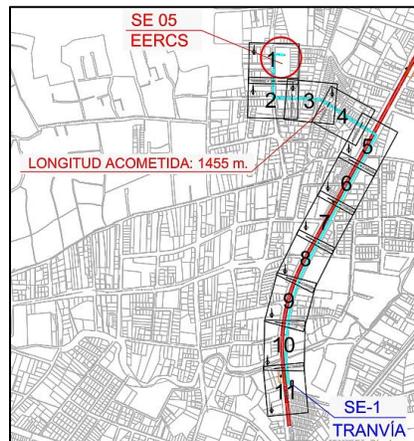


Figura 4.2. Recorrido de la Acometida desde el Alimentador 0528 hacia la SE-1.

Fuente: “Estudios complementarios y de Ingeniería Básica de la Red Primaria de Transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de Los Cuatro Ríos”. Anexo 9. Planos [31].

Estas acometidas trifásicas simples en MT a 22 kV están conformadas por un cable 3F4H, en donde la fase corresponde a un cable 3 x (2 x 250 kcmil) Cu XLPE 25 kV, con neutro formado por un cable (2 x 250 kcmil) Cu XLPE 25 kV que interconectan los alimentadores de las SE de la EERCS con las SEF.

4.4.2. SE del tranvía:

Para el abastecimiento energético de los transformadores de línea y servicios auxiliares del tranvía, se tienen 6 SE de tracción propia distribuidas a lo largo del recorrido tranviario tal como se puede evidenciar en la figura 4.3, clasificadas en tres tipos:

1. 2 SE de Tracción Rectificadoras de Alimentación de Final de Línea (SEF) alimentadas por las acometidas provenientes de las SE 04 y 05 de la EERCS. Las SE se identifican como SE-1 ubicada en el sector del Control Sur y la SE-5 ubicada en el Parque Industrial.

2. 3 SE de Tracción Rectificadoras de Alimentación Intermedias (SEI), identificadas como SE-2 ubicada en el tramo 1 del recorrido, SE-3 ubicada en el tramo 2 y SE-4 ubicada en el tramo 3.
3. Una Subestación Rectificadora de Alimentación a Instalaciones Propias de las cocheras y talleres (SE-T/C) ubicada en el tramo 1 en la nave de cocheras y talleres.

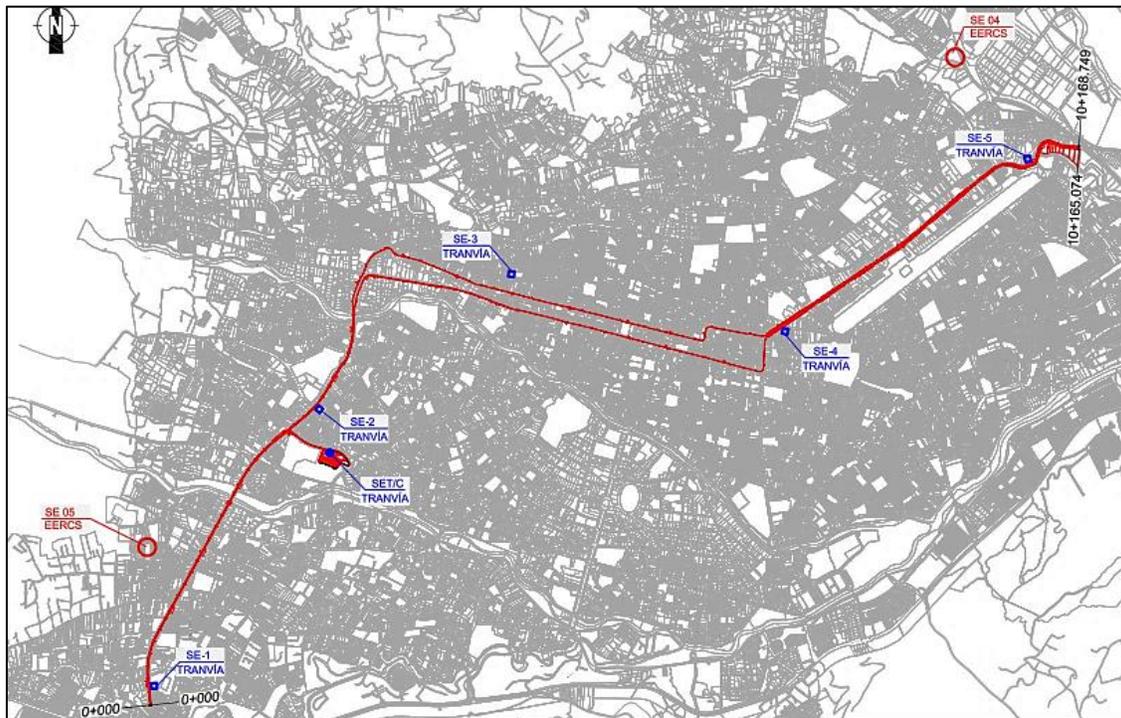


Figura 4.3. Ubicación geográfica de las SE de Tracción.

Fuente: “Estudios complementarios y de Ingeniería Básica de la Red Primaria de Transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de Los Cuatro Ríos”. Anexo 9. Planos [31].

Las 5 SE de tracción rectificadoras denominadas SE-1, SE-2, SE-3, SE-4 y SE-5 se destinan para la alimentación de los servicios auxiliares de cada subestación, los bloques técnicos de las paradas y la catenaria por medio de los transformadores de línea ubicada a lo largo del recorrido de Tranvía. Estas SE han sido dimensionadas para soportar los requerimientos energéticos en condiciones de operación normal y con falla o contingencia en un escenario de operación inicial y de demanda futura capaces de abastecer la carga total de sus instalaciones. En la tabla 4.3, se especifica la ubicación a partir de su PK, que es la distancia con referencia al punto cero, de cada una de las SE, así como la distancia entre cada una de estas.

Tabla 4.3. Ubicación aproximada de SE de Alimentación a Línea.

Fuente: “Estudios complementarios y de Ingeniería Básica de la Red Primaria de Transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de Los Cuatro Ríos”. E2.05: Diseños Eléctricos. Anexo 1 [31].

SE	Distancia entre SE [m]	Ubicación
SE - 1	2610	PK 0+145
SE - 2	2645	PK 2+700
SE - 3	2555	PK 5+140 / PK 4-940
SE - 4	2345	PK 7-360
SE - 5	0	PK 9-640

A las SEF llegan las acometidas trifásicas provenientes de la SE 05 que alimenta a las SE-1, SE-2 y SE-T/C y de la SE 04 que alimenta las SE-3, SE-4 y SE-5 a un nivel de MT de 22 kV. El esquema general de la distribución de las SE propias y de la EERCs se observa en la figura 4.4, en donde se tiene que las SE de tracción rectificadoras de alimentación se interconectan entre sí en cascada a un nivel de MT mediante una acometida 3F4H mediante un cable 3 x (2 x 250 kcmil) Cu XLPE 25 kV, con neutro formado por un cable (2 x 250 kcmil) Cu XLPE 25 kV.

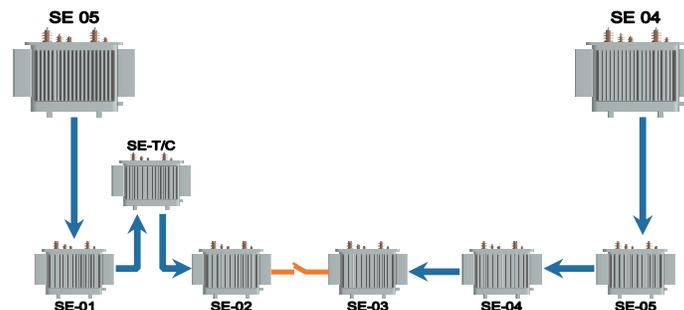


Figura 4.4. Esquema General de Línea con Distribución de SE.

Fuente: “Estudios complementarios y de Ingeniería Básica de la Red Primaria de Transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de Los Cuatro Ríos”. E2.05: Diseños Eléctricos. Anexo 1 [31].

En las SEI y SEF se abastecerán los transformadores de servicios auxiliares y de línea a través de una red interna propia del tranvía canalizada a través de la plataforma y que se extiende por todo su trazado mediante un cable 3F3H compuesto de un cable 3 x (1x250 kcmil) Cu XLPE de 25 kV. En la SE-T/C se encuentra un transformador de 1,000 kVA a 22 kV/0.220 kV/0.127 kV de doble secundario, asignando 50 kVA a los servicios auxiliares y 950 kVA las instalaciones propias de las cocheras y talleres, y un transformador de doble secundario de 630 kVA a 22 kV/0.590 kV para la alimentación de línea.



4.4.3. Grupos transformadores de alimentación:

4.4.3.1. Grupo transformador – rectificador para la alimentación de la línea:

El grupo transformador de tracción de cada SE para la alimentación de la línea está compuesto por dos transformadores trifásico de potencia por subestación de 22kV/0.590kV, doble secundario y de potencia nominal de 1,000 kVA. A la salida de los secundarios del transformador se conecta un grupo rectificador dodecafásico de 900 kW a 750 VDC mediante una red interna con un circuito 3F3H conformado por un cable 3 x 3(1x750 kcmil) Cu XLPE USE-2 de 2 kV. En la tabla 4.4, se muestra las características eléctricas de los transformadores de línea:

Tabla 4.4. Características Eléctricas de los Transformadores de Tracción en SE de Línea.

Fuente: “Estudios complementarios y de Ingeniería Básica de la Red Primaria de Transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de Los Cuatro Ríos”. E2.05: Diseños Eléctricos. Anexo 1 [31].

Descripción	Característica
Potencia Nominal	500 + 500 kVA
Grupo de Conexión	Dd0 - Y11
Tensión Primaria	22 kV
Tensión Secundaria	590 VAC (por cada secundario)
Tomas Ajuste Tensión Primaria	± 10%
Frecuencia	60 Hz
Tensión de Cortocircuito	8%
Nro. De Fases	3 en AT / 6 en BT

4.4.3.2. Grupo transformador – rectificador para la alimentación de cocheras-talleres:

Para la alimentación de la línea de Cocheras y Talleres se dispone de un transformador trifásico de potencia de 22kV/0.590kV, doble secundario y potencia nominal de 630 kVA. A la salida de los secundarios del transformador se conecta un grupo rectificador dodecafásico de 500 kW a 750 VDC mediante una red interna con un circuito 3F3H conformado por un cable 3 x 3(1x250 kcmil) Cu XLPE USE-2 de 2 kV. Las características eléctricas de este tipo de transformadores se presentan en la tabla 4.5.



Tabla 4.5. Características Eléctricas de los Transformadores de Tracción en SE-C/T.

Fuente: “Estudios complementarios y de Ingeniería Básica de la Red Primaria de Transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de Los Cuatro Ríos”. E2.05: Diseños Eléctricos. Anexo 1 [31].

Descripción	Característica
Potencia Nominal	315 + 315 kVA
Grupo de Conexión	Dd0 - Y11
Tensión Primaria	22 kV
Tensión Secundaria	590 VCA (por cada secundario)
Tomas Ajuste Tensión Primaria	$\pm 10\%$
Frecuencia	60 Hz
Tensión de Cortocircuito	8%
Nro. De Fases	3 en AT / 6 en BT

4.4.3.3. Grupo transformador para estaciones y servicios auxiliares

Para la alimentación de los bloques técnicos de paradas y servicios auxiliares se dispone de un transformador trifásico de potencia doble secundario de 250 kVA a un nivel de tensión de 22kV/0.22kV/0.48kV en donde, la alimentación para la red de las paradas se realiza a 480 VCA, y los servicios auxiliares de SE del tranvía a 220 VCA. La interconexión de los secundarios del transformador y el cuadro de servicios auxiliares corresponde a una red interna con un circuito 3F4H compuesto por un cable 4 x (1x1 AWG) Cu XLPE USE-2 600 VCA, y la interconexión del secundario con el bloque técnico se realiza con un circuito 3F3H con un cable 3 x (1x4/0 AWG) Cu XLPE USE-2 600 VCA. Las características de los transformadores de distribución en las estaciones y servicios auxiliares se presentan a continuación en la tabla 4.6.

Tabla 4.6. Características Eléctricas de Transformadores de Distribución CA estaciones y SSAA.

Fuente: “Estudios complementarios y de Ingeniería Básica de la Red Primaria de Transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de Los Cuatro Ríos”. E2.05: Diseños Eléctricos. Anexo 1 [31].

Descripción	Característica
Potencia Nominal	50 + 200 kVA
Grupo de Conexión	Dyn11 - Dy11
Tensión Primaria	22 kV
Tensión Secundaria	220 / 480 VCA
Tomas Ajuste Tensión Primaria	$\pm 2.5, \pm 5\%$
Frecuencia	60 Hz
Tensión de Cortocircuito	6%
Nro. De Fases	3 en AT / 6 en BT



4.4.3.4. Grupo transformador para cocheras-talleres y servicios auxiliares en SE:

La alimentación en baja tensión para la distribución a nivel de 220 VCA de las instalaciones del local de Cocheras-Talleres y sus respectivos servicios auxiliares al mismo nivel de voltaje, se realiza a partir del suministro en MT a 22 kV desde su transformador de simple secundario y potencia nominal de 1,000 kVA a 22kV/0.22kV. Las características de los transformadores de distribución en Cocheras-Talleres y servicios auxiliares de SE se muestran en la tabla 4.7.

Tabla 4.7. Características Eléctricas de Transformadores de Distribución CA en Cocheras y Talleres y para SSAA de SE.

Fuente: “Estudios complementarios y de Ingeniería Básica de la Red Primaria de Transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de Los Cuatro Ríos”. E2.05: Diseños Eléctricos. Anexo 1 [31].

Descripción	Característica
Potencia Nominal	50 + 200 kVA
Grupo de Conexión	Dyn11 - Dy11
Tensión Primaria	22 kV
Tensión Secundaria	220 / 480 VCA
Tomas Ajuste Tensión Primaria	$\pm 2.5, \pm 5\%$
Frecuencia	60 Hz
Tensión de Cortocircuito	6%
Nro. De Fases	3 en AT / 6 en BT

4.4.4. Línea de alimentación a catenaria:

A la salida de las celdas rectificadoras a 750 VDC de los transformadores de línea de las SE del tranvía, se utiliza cuatro cables 4 x (1x600 kcmil) Cu XLPE 2 kV para interconectar las celdas con cada uno de los alimentadores (*feeders*) de acompañamiento formado por dos cables 2 x (1x600 kcmil) Cu XLPE 2 kV y que se conectará a su vez con la catenaria o línea aérea de contacto como polo positivo, mientras que el carril de la vía del tranvía se toma como el polo negativo. Las conexiones del alimentador a la línea aérea se realizarán siempre mediante un seccionador en la punta de poste, de modo que se pueda controlar la aplicación de voltaje a la línea por sectores.



4.4.5. La catenaria:

La electrificación del material rodante del tranvía se da por las líneas de contacto o catenarias que es un sistema de alimentación que permite transportar la energía eléctrica desde las SE de tracción de alimentación hacia el material rodante. El voltaje de alimentación de la catenaria es de 750 VDC que se obtiene a la salida de las celdas rectificadoras de los distintos grupos transformadores de alimentación.

Esta electrificación se basa por un lado en un sistema de tecnología LAC conformada por un hilo conductor único de cobre en paralelo a la vía ferroviaria de 150 mm² por vía sin hilo sustentador y alimentador de acompañamiento, nivel de aislamiento eléctrico de 1,500 VDC y capaz de soportar una velocidad máxima del material rodante de 70 km/h aproximadamente. La altura nominal del hilo de contacto sobre el plano de rodamiento es de 5.50 m, a excepción de la nave de Cocheras-Talleres en donde la altura es mayor con el fin de obtener una distancia de seguridad eléctrica con los puentes grúa. Esta tecnología se encuentra instalada en los tramos 1 y 3 de la vía tranviaria.

Para el tramo 2 se ha instalado una catenaria de tecnología APS integrada en la plataforma de la vía como un tercer riel que no representa un peligro para las personas o animales que circulen por sus inmediaciones ya que no se encuentra energizado sino hasta que el material rodante pase por esa sección, y así evitar el impacto visual de la catenaria aérea en el tramo del centro histórico y preservar su estética visual y patrimonial.

4.4.6. Descripción de los circuitos eléctricos y sus canalizaciones:

Para la interconexión de los diferentes elementos de las instalaciones eléctricas del tranvía (transformadores, grupos rectificadores, líneas de alimentación, bloques técnicos) se tienen los siguientes circuitos:

1. Los circuitos de MT de las acometidas desde los alimentadores en las SE de la EERCS con cada SEF y estas con el resto de SEI, son circuitos con configuración 3F4H con cables 3 x (2 x 250 kcmil) Cu XLPE para 25 kV y neutro formado por un cable (2 x 250 kcmil) Cu XLPE 25 kV.



2. Los circuitos en MT que alimentan desde la barra de la SE a los transformadores de servicios auxiliares y de línea de alimentación son circuitos 3F3H con cable 3 x (1 x 250 kcmil) Cu XLPE para 25 kV.
3. A la salida del devanado secundario de los Transformadores de Servicios Auxiliares para conectarse con los cuadros de distribución en BT (220 V) de las SE de Tracción de Alimentación del tranvía, se tiene un circuito 3F4H con un cable 4 x (1x1 AWG) Cu XLPE USE-2 600 V. Para el secundario que alimenta a los bloques técnicos de las paradas en BT (480 V) se ha considerado un circuito 3F3H con un cable 3 x (1 x 4/0 AWG) Cu XLPE USE-2 600 V. A la salida del secundario del transformador de Servicios Auxiliares de la SE de Tracción de Cocheras y Talleres y que abastece a los cuadros de servicios generales de distribución y los cuadros de instalaciones de la subestación en BT (220/127 V) se tiene un circuito 3F3H con un cable 3 x (1 x 4/0 AWG) Cu XLPE USE-2 600 V.
4. Para el cableado que conectan los secundarios de los Transformadores de Tracción de Alimentación de Línea con el grupo rectificador de la SE, se ha optado por un circuito 3F3H mediante un cable 3 x (3 x 750 kcmil) Cu XLPE USE-2 2 kV, ya que el nivel de tensión nominal de estos circuitos es de 590 VCA.
5. La conexión del secundario del Transformador de Tracción de Alimentación a Línea con el grupo rectificador de la SE-C/T es un circuito 3F3H con un cable 3 x (3 x 250 kcmil) Cu XLPE USE-2 2 kV.
6. La salida de las Celdas Rectificadoras de cada SE de Tracción de Alimentación de Línea hacia los alimentadores se lo realiza con un cable 4 x (1 x 600 kcmil) Cu XLPE 2 kV, y desde los alimentadores de acompañamiento hacia las catenarias mediante un cable 4 x (1 x 600 kcmil) Cu XLPE 2 kV. En la SE-C/T se tiene una línea desde la celda rectificadora hacia los alimentadores y desde los alimentadores de acompañamiento hacia la catenaria con un cable 2 x (1 x 600 kcmil) Cu XLPE 2 kV para ambos casos.
7. Para el resto de instalaciones en BT (auxiliares en SE y paradas) se ha considerado cable con aislamiento tipo TTU.
8. Para la conducción de las corrientes de retorno se emplean los propios carriles de la vía y se canalizará un cable de guarda o de puesta a tierra de cobre desnudo calibre 4/0 AWG.



El tendido no será de principio a fin de la traza, sino que se hará por secciones de unos 700 m aproximadamente, de tal forma que se evite la circulación de corrientes parásitas por este circuito.

En las figuras 4.5 y 4.6, se observa el diagrama unifilar del sistema eléctrico del proyecto tranvía para las SEF desde las SE 05 y 04 de la EERCS. En la figura 4.7, el diagrama unifilar del sistema eléctrico de las SEI de las SE-02, SE-03 y SE-04 del tranvía. En la figura 4.8 el diagrama unifilar del sistema eléctrico de la SE de tracción e instalaciones de Cocheras y Talleres del sistema tranviario.

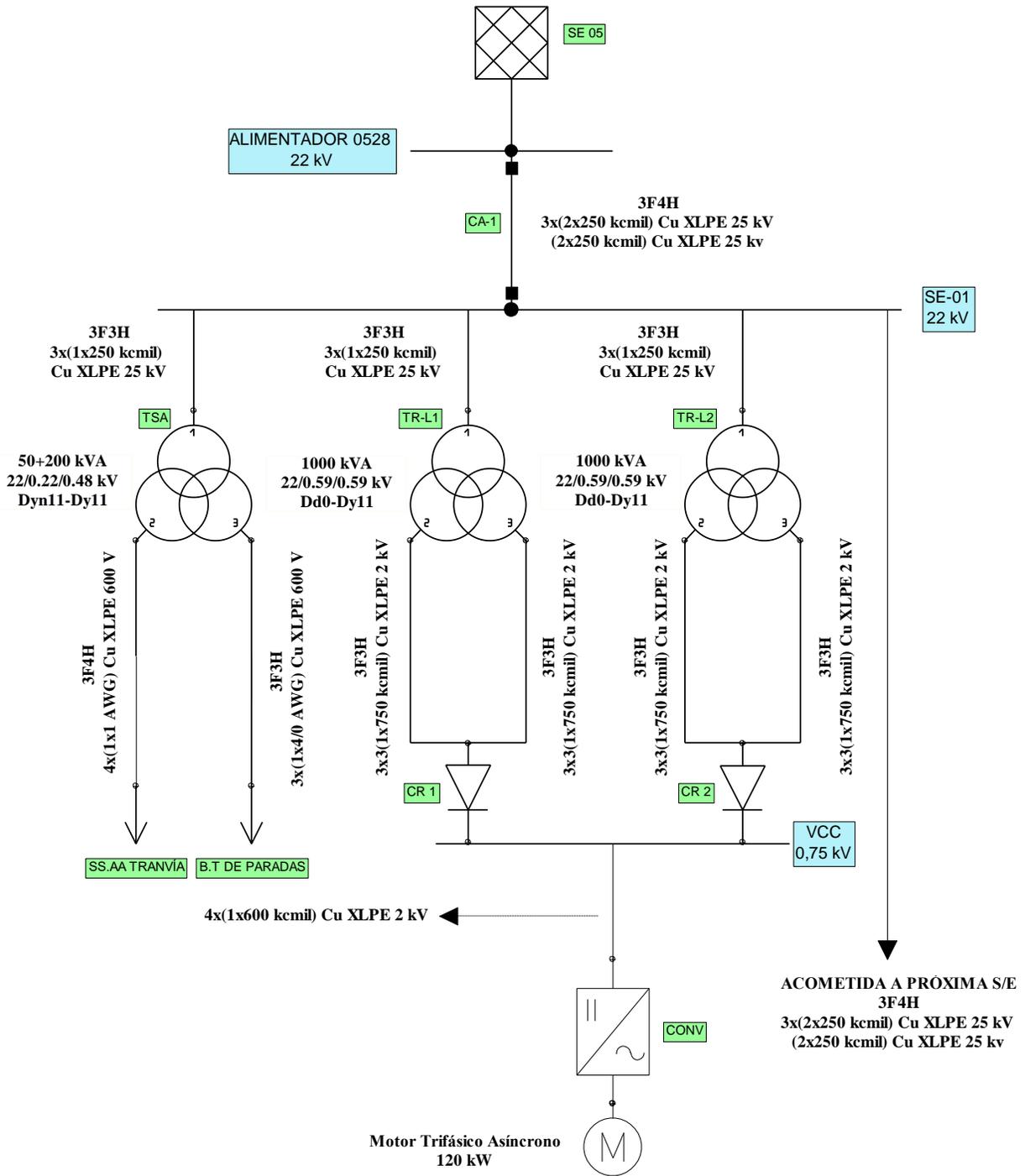


Figura 4.5. Diagrama Unifilar de la SEF desde SE 05.

Fuente: "Estudios complementarios y de Ingeniería Básica de la Red Primaria de Transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de Los Cuatro Ríos". E2.05: Diseños Eléctricos. Anexo 1 [31].

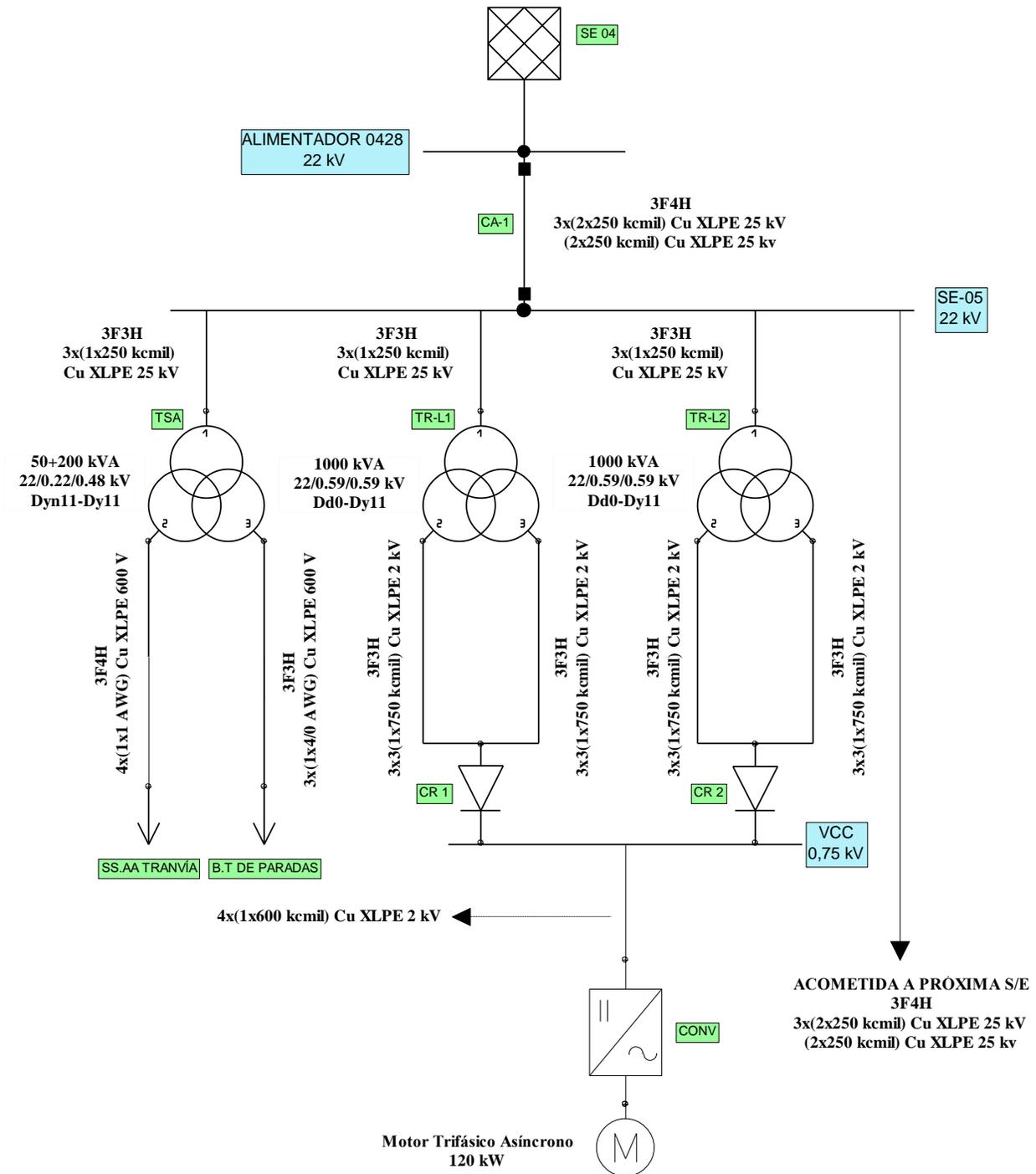


Figura 4.6. Diagrama Unifilar de la SEF desde SE 04.

Fuente: “Estudios complementarios y de Ingeniería Básica de la Red Primaria de Transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de Los Cuatro Ríos”. E2.05: Diseños Eléctricos. Anexo 1 [31].

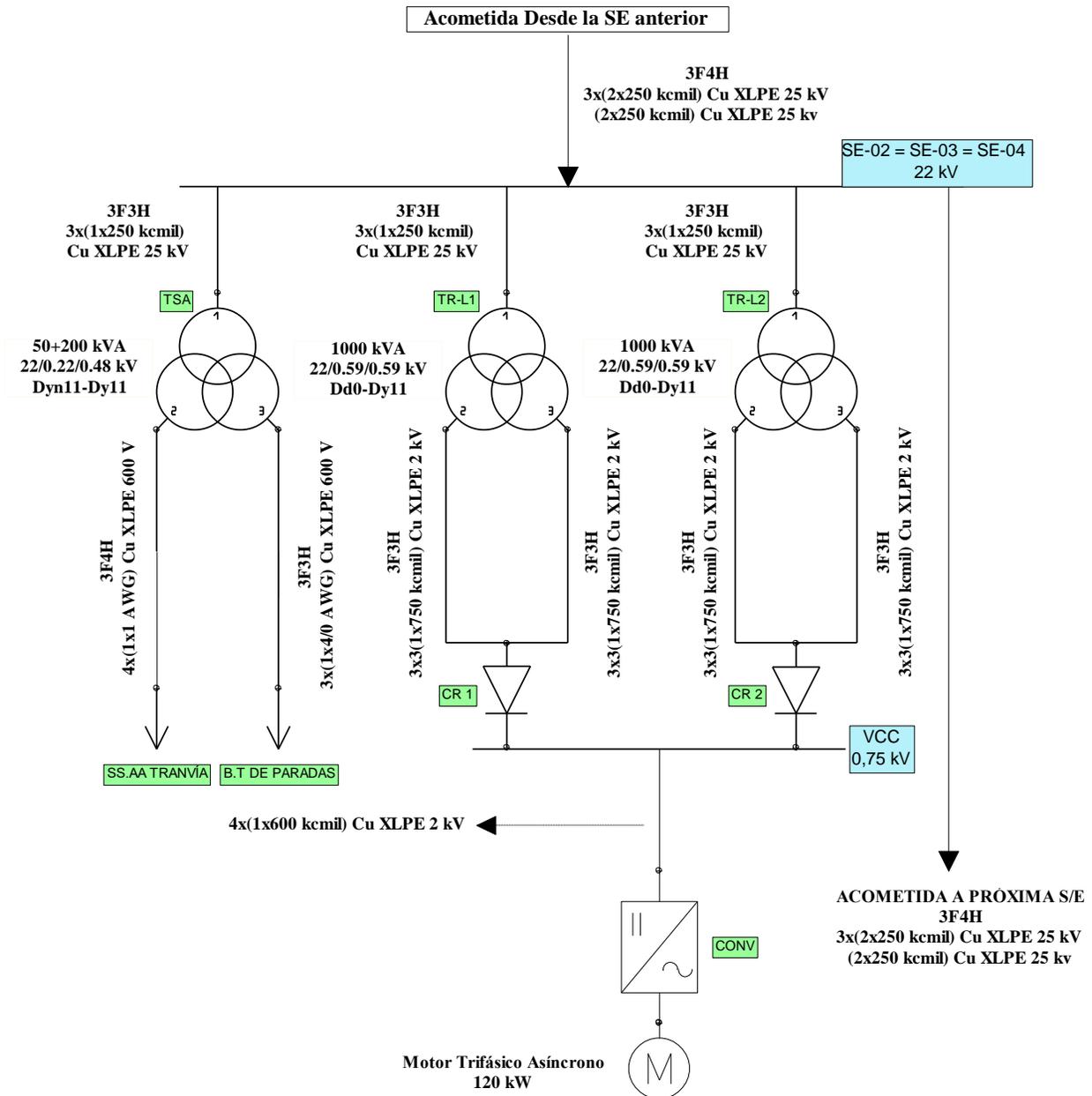


Figura 4.7. Diagrama Unifilar de la SEI (SE-02=SE-03=SE-04).

Fuente: "Estudios complementarios y de Ingeniería Básica de la Red Primaria de Transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de Los Cuatro Ríos". E2.05: Diseños Eléctricos. Anexo 1 [31].

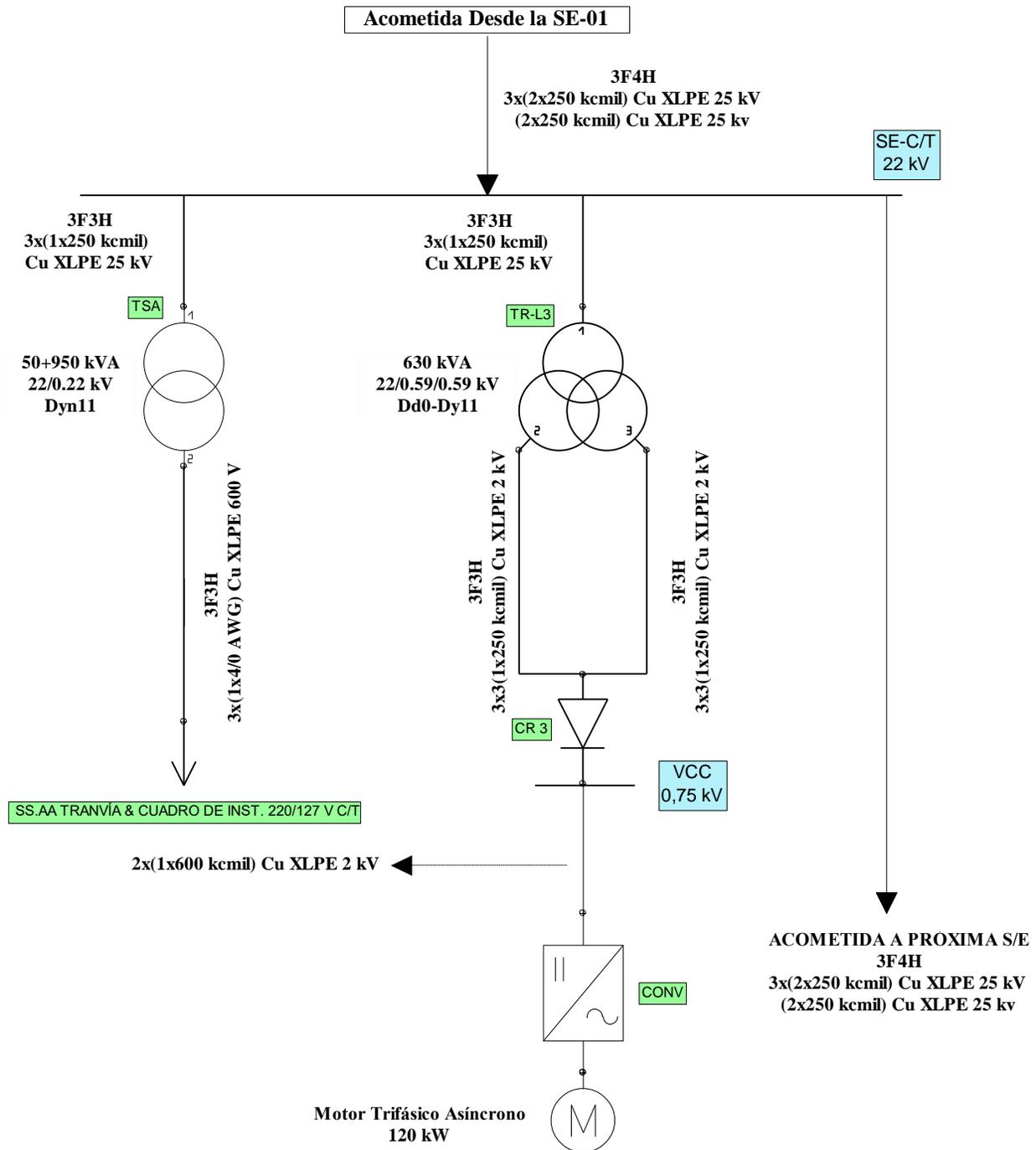


Figura 4.8. Diagrama Unifilar de la SE-C/T.

Fuente: "Estudios complementarios y de Ingeniería Básica de la Red Primaria de Transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de Los Cuatro Ríos". E2.05: Diseños Eléctricos. Anexo 1 [31].

Adicionalmente, para la simulación de distintos escenarios operativos y análisis de los parámetros de demanda, consumo y calidad de la energía del sistema tranviario mediante el software OpenDSS, se debe especificar la disposición y distancias entre líneas conductoras de las distintas acometidas y redes en MT y BT. Así, para el tendido del circuito de la acometida desde los alimentadores hacia las SEF del tranvía, la EERCS ha establecido que se tienda un cable en cada tubo de acuerdo a la disposición de la figura 4.9.

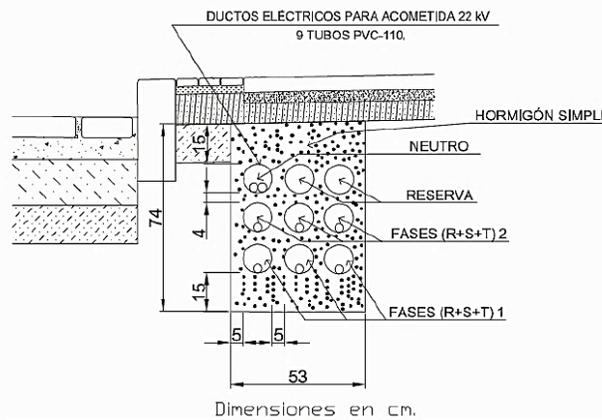


Figura 4.9. Esquema de la ocupación de ductos para el tendido de la Acometida en MT desde los Alimentadores.
Fuente: “Estudios complementarios y de Ingeniería Básica de la Red Primaria de Transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de Los Cuatro Ríos” Diseños Eléctricos [31].

Para el tendido de la red de MT a 22 kV en la entrada y salida de cada SEI del tranvía, se tiene la disposición de la figura 4.10.

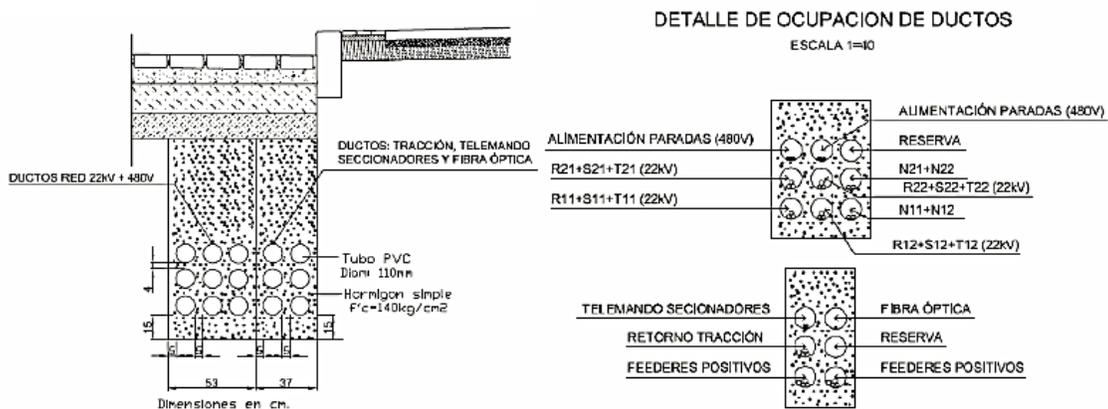


Figura 4.10. , Esquema de la ocupación de ductos para el tendido de la Red de MT y BT en las SEI.
Fuente: “Estudios complementarios y de Ingeniería Básica de la Red Primaria de Transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de Los Cuatro Ríos” Diseños Eléctricos [31].

En la SE-C/T se tiene la siguiente disposición para los ductos que traen la acometida hacia la SE y los circuitos de tracción de alimentación según se especifica en la figura 4.11.

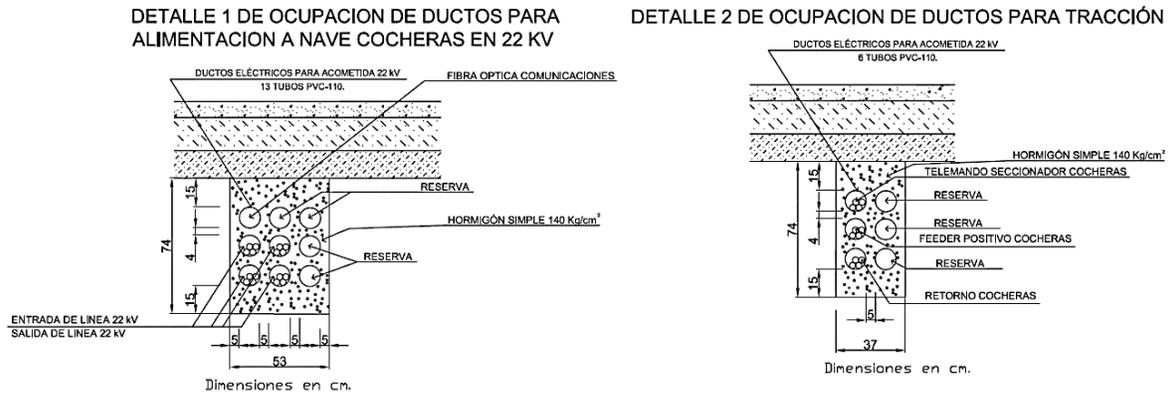


Figura 4.11. Esquema de la ocupación de ductos para el tendido de la Red de MT y BT en la SE-C/T.
Fuente: “Estudios complementarios y de Ingeniería Básica de la Red Primaria de Transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de Los Cuatro Ríos” Diseños Eléctricos [31].



5. Consumo y eficiencia energética del sistema de transporte público

5.1. Introducción

En este capítulo se presenta un estudio comparativo del consumo y eficiencia energética entre el sistema de transporte público actual de la ciudad de Cuenca basado en el consumo de combustibles fósiles y que goza de la mayor aceptación entre los usuarios, y sus símiles eléctricos. También se realiza la comparación de consumo y eficiencia energética de los sistemas de transporte eléctricos (EV, BEB y tranvía) en la ruta comercial del tranvía. Este estudio pretende justificar la transición hacia la movilidad eléctrica en cumplimiento con la Ley de Eficiencia Energética vigente en el Ecuador. Se determina la composición de la matriz energética primaria del país e identifica el sector con el mayor consumo energético según el Balance Energético Nacional. Se calcula el consumo y eficiencia energética de los sistemas de transporte de combustión interna y de tracción eléctrica en base a los datos de los fabricantes. Se plantea un modelo matemático para determinar el consumo y eficiencia energética del BEB en la ruta del tranvía. Se determina de forma experimental, el consumo y eficiencia energética del EV en la ruta del tranvía utilizando el Kia Soul EV del Laboratorio de Microrred de la Universidad de Cuenca. Se calcula el consumo y eficiencia energética del tranvía en su etapa de pruebas operativas de marzo de 2019 y se determina un perfil de demanda diario que se toma como referencia para un escenario hipotético de operación comercial.

5.2. Antecedentes

Todos los cambios, mejoras tecnológicas y de gestión que producen una reducción y optimización en el consumo energético de un determinado sector para generar o brindar un mejor

servicio energético promoviendo la sostenibilidad económica, social y ambiental se conoce como eficiencia energética.

Desde un punto de vista socioeconómico, el concepto de la eficiencia energética abarca a todos los sectores estratégicos de la sociedad actual impactando profundamente en su sostenibilidad económica mediante la generación de ingresos y empleo de alta especialización [36].

Desde un punto de vista técnico, la eficiencia energética determina la capacidad de un sistema para “convertir” sus fuentes primarias de energía en energía “útil o demandada”, identificando la cantidad de energía que se “pierde” en el proceso de transformación y distribución hasta el usuario final. En este sentido, la eficiencia se calcula como la relación entre la cantidad de energía final consumida o aprovechada y la cantidad de energía primaria empleada en los procesos de transformación energética, siendo su objetivo la reducción del consumo manteniendo los mismos servicios energéticos sin afectar el confort y calidad de vida del usuario [36]. De acuerdo a la figura 5.1, la matriz energética primaria del país según el Balance Energético Nacional del 2018 [22], está conformada principalmente por fuentes de energía no renovables, así los combustibles fósiles representan un 87.5% y el gas natural un 4.7% de la producción total de energía, frente a un 7.8% de las energías renovables que, a pesar de su escasa participación, cada año están ganando terreno y desplazando a las fuentes de energía convencionales como fuente primaria de energía.

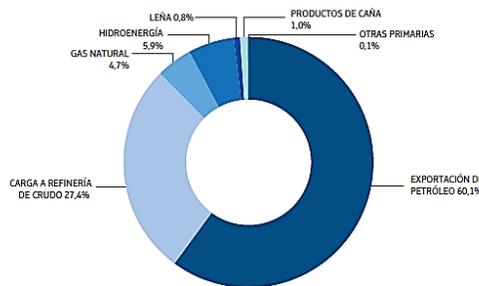


Figura 5.1. Producción de Energía Primaria en el Ecuador.
Fuente: Balance Energético Nacional 2018 [22].

Según [22] y como se evidencia en la figura 5.2, el principal sector de consumo energético es el de transporte que demanda un 48.8% del total de la energía disponible. Por ello, se hace

imprescindible promover la eficiencia energética en este sector e incorporarla como una política pública con un enfoque energético, económico y ambiental impulsando de esta forma la optimización de recursos energéticos y el incremento de la competitividad del transporte en el país con el objeto de reducir de forma gradual el uso de combustibles fósiles fomentando la movilidad sostenible.

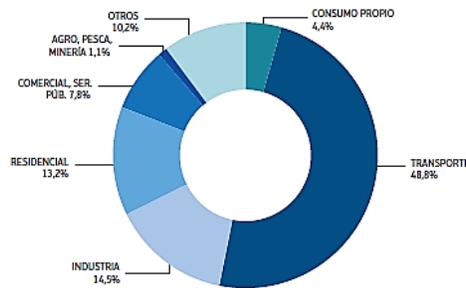


Figura 5.2. Estructura del Consumo de Energía por Sectores en el Ecuador.
Fuente: Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016-2035 [37].

Desde una perspectiva ambiental, la generación y consumo de energía son las principales causas de contaminación atmosférica debido a la generación de GEI y otros gases nocivos para la salud, que han venido en aumento año tras año debido también al incremento de la demanda energética, principalmente en el sector del transporte que se ha convertido en el principal agente contaminante por su alta demanda energética proveniente de fuentes no renovables, así como en el sector industrial y de generación de energía eléctrica mediante centrales térmicas.

En el Ecuador, el ente responsable de formular las estrategias y políticas para el fomento y ejecución de programas de eficiencia energética es el MERNNR, que debe garantizar la estabilidad y permanencia de las políticas, planes y proyectos de eficiencia energética en el largo plazo, mediante el fortalecimiento de los marcos jurídico e institucional existentes para la promoción de la eficiencia energética en el Ecuador. En el sector transporte se busca generar proyectos que produzcan beneficios importantes en el sector mediante la optimización del consumo energético en el transporte de carga y pasajeros mediante la ejecución de propuestas de política pública hacia un transporte sustentable. Estas propuestas se basan en la optimización de la infraestructura de circulación del transporte que contribuya a la reducción del consumo de



combustibles, el reemplazo de tecnologías y técnicas poco eficientes de transporte y sustituir energéticos utilizados como combustible promoviendo la incorporación de vehículos híbridos, eléctricos y nuevas tecnologías de transporte y la sustitución de los combustibles fósiles por mezcla con biocombustibles [37].

5.3. Consumo y eficiencia energética de los sistemas de transporte de combustión interna

La eficiencia energética en los medios de transporte se determina como relación entre la distancia recorrida por la unidad con carga y la energía total utilizada para moverla, que, por lo general, proviene de combustibles fósiles y energía eléctrica como fuente energética de propulsión. La inversa de la eficiencia energética se conoce como el Consumo de energía. En el SI la unidad de medida de la eficiencia energética para los sistemas de transporte es el metro por Joule [m/J], mientras que la unidad de medida del consumo energético es el Joule por metro [J/m]. Cuando la energía proviene de combustibles líquidos para el transporte de pasajeros, es muy común utilizar como unidad de medida de la eficiencia energética la distancia recorrida por unidad de volumen de combustible. Así en el SI la unidad es el [km/L] y en el sistema inglés es la [mi/gal] o MPG, mientras que para el consumo energético se utiliza como unidad de medida el volumen de combustible por distancia recorrida, así en el SI la unidad de medida es [L/100 km] o en el sistema inglés el [gal/100 mi].

Por cuestiones comparativas entre la eficiencia de los vehículos de combustión interna y los eléctricos, se ha establecido una equivalencia de la cantidad de energía eléctrica en kWh que se pueden obtener de un volumen de combustible (gasolina “Ecopaís” y diésel “Premium”) que se comercializa en el país y que es utilizado por los medios de transporte de combustión interna como fuente energética. Así se ha considerado que 1 Litro de gasolina “Ecopaís” equivale a 9.73 kWh [38], mientras que 1 Litro de diésel “Premium” equivale a 9.96 kWh [39], aproximadamente.



5.3.1. Consumo y eficiencia energética del vehículo utilizado como servicio de transporte público (taxi)

En la actualidad, el taxi se está convirtiendo en una alternativa viable en el contexto de la implementación de un nuevo esquema de transportación pública sostenible y eficiente en la ciudad, debido a la personalización y comodidad en el servicio brindado ya que se trata de un transporte público individual puerta a puerta, usado generalmente para actividades específicas. Hoy en día, aplicaciones como Uber y otros han permitido la masificación de vehículos particulares para estos servicios, además de aplicaciones móviles como “azutaxi” en la ciudad de Cuenca, que permiten un manejo más rápido y seguro del uso de estos vehículos.

Los vehículos que pueden ser utilizados como taxi para el transporte público urbano son autos tipo *Sedán, Station Wagon o Hatch Back*, siendo las marcas más utilizadas como taxi en la ciudad el Hyundai Accent y Chevrolet Aveo [40]. Las especificaciones técnicas de cada vehículo son resumidas en la tabla 5.1 e indican que la eficiencia y el consumo energético de las unidades es muy similar.

Tabla 5.1. Especificaciones Técnicas del fabricante de los vehículos más utilizados como taxi en Cuenca.
Fuente: Análisis de viabilidad para la implementación de un vehículo eléctrico que preste el servicio de taxi en la ciudad de Cuenca [41].

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS		
Marca	Chevrolet	Hyundai
Modelo	Aveo	Accent
Cilindraje [cm ³]	1,600	1,600
Potencia [hp - rpm]	103 - 6,000	122 - 6,000
Capacidad del tanque de Combustible [L - gal]	45 - 11.9	43 - 11.36
Nro. de Pasajeros	5	5
Eficiencia Energética [km/L - MPG]	12.32 - 29	13.17 - 31
Consumo de Energía [L/ 100km - gal/100 mi]	20.71 - 3.4	19.49 - 3.2



Según [40] y la tabla 5.2, un taxi en un día de trabajo en la ciudad de Cuenca presenta un recorrido total de 359.89 km, de los cuales 117.59 km se los emplea en recorridos con pasajeros y 242.30 km en recorridos sin pasajeros, un consumo de 13.66 L/100km o 132.94 kWh/100km y una eficiencia energética promedio de 7,32 km/L que equivale a 18 MPG o 0.75 km/kWh.

Tabla 5.2. Consumo y eficiencia energética diaria aproximada de una unidad de taxi en la ciudad de Cuenca.
Fuente: Metodología para la obtención de los indicadores que describen la operación de taxis en la ciudad de Cuenca [40].

VARIABLE	UNIDAD	TAXI CON PASAJERO	TAXI SIN PASAJERO
Consumo Combustible	[gal – L]	4.36 – 16.50	8.63 – 32.67
Distancia Recorrida	[mi – km]	73.08 – 117.59	159.59 – 242.30
Consumo Total	[gal – L - kWh]	12.99 – 49.17 – 478.42	
Recorrido Total	[mi – km]	232.67 – 359.89	
Eficiencia Energética Diaria	[km/L]	7.32	
	[MPG]	17.91	
	[km/kWh]	0.75	
Consumo de Energía Diario	[L/ 100km]	13.66	
	[gal/100 mi]	3.62	
	[kWh/100km]	132.94	

Para determinar el consumo y la eficiencia energética por recorrido con pasajero de un taxi convencional en la ciudad de Cuenca, se han considerado factores como la cantidad de pasajeros que ocupan una unidad, el número de carreras diarias, la distancia y la duración promedio de cada recorrido. Según [30] y [40] por lo general 2 pasajeros viajan en una unidad, se realizan 30 carreras diarias, la distancia promedio de cada carrera es de 3.92 km y su duración promedio oscila entre 6 y 30 minutos. Así, el consumo por carrera es aproximadamente 14.03 L/100km o 136.53 kWh/100km y por pasajero es de 0.28L/pasajero o 2.68 kWh/pasajero con una eficiencia energética de 7.13 km/L o 0.73 km/kWh, información que se resume en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Consumo y eficiencia energética por carrera de una unidad de taxi en la ciudad de Cuenca.
Fuente: Metodología para la obtención de los indicadores que describen la operación de taxis en la ciudad de Cuenca [40].

Nro. Pasajeros por Carrera	Nro. Carreras	Consumo de Combustible/Energía por Carrera [L] [kWh]	Distancia por Carrera [km]	Consumo de Energía [L/100km] [kWh/100km]	Eficiencia Energética [km/L] [km/kWh]	Energía consumida por Pasajero [L/pasajero] [kWh/pasajero]
2	30	0.55	3.92	14.03	7.13	0.28
		5.35		136.53	0.73	2.68



5.3.2. Consumo y eficiencia energética del autobús urbano a motor de combustión interna

En la “ordenanza que regula las condiciones para el mejoramiento de la calidad del servicio de transporte público de pasajeros de buses urbanos en el cantón cuenca y su plan de renovación” expedida en el año 2014, se establece que las condiciones de servicio del transporte público mediante autobuses urbanos atraviesan un deterioro en la calidad del servicio a los usuarios y que las unidades están cumpliendo su período de vida útil (20 años), razón por la cual se han incrementado los niveles de ruido y contaminación del aire. Dicha ordenanza reitera que la constitución de la República del Ecuador establece la competencia exclusiva de los gobiernos municipales para planificar, regular y controlar el tránsito en el transporte terrestre dentro de su territorio cantonal a fin de mitigar y remediar estos problemas y garantizar la sostenibilidad y el buen vivir de los ciudadanos. Esta regulación local establece las condiciones mínimas de prestación de servicio, en donde una de ellas es renovar la flota vehicular de autobuses compuesta por 475 unidades de forma íntegra dentro del plazo que establece el plan de renovación vigente que tiene como máximo el mes de marzo de 2020 [42].

Hasta el momento en cumplimiento de la ordenanza vigente, se ha renovado una parte de la flota de autobuses por unidades Hino AK8JRSA y Volkswagen 17-260 que han sido considerados por su tecnología, confort, mayor eficiencia energética y sobre todo menos contaminantes con el ambiente por la reducción de emisiones de MP2.5 y la opacidad que no debe superar el 25% durante su vida útil en relación a las actuales unidades de transporte público urbano. Las principales características técnicas de las unidades que están reemplazando a las actuales en la flota de autobuses de la ciudad de Cuenca se detallan en la tabla 5.4, en donde se indica que cada unidad cumple con los requerimientos técnicos de emisiones y opacidad exigidos en la ordenanza.

Tabla 5.4. Especificaciones Técnicas de los autobuses en Cuenca.
Fuente: Especificaciones técnicas Hino Serie Bus [43] y Volkswagen 17-260 [44].

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS		
Marca	HINO	VOLKSWAGEN
Modelo	AK8JRSA	17-260
Cilindraje [cm ³]	7,684	6,810



Potencia [hp - rpm]	250 - 2,500	260 - 2,300
Capacidad del tanque de Combustible [L - gal]	300 - 80	275 - 73
Nro. de Pasajeros	80	90
Eficiencia Energética [km/L – MPG – km/kWh]	2.55 – 6.00 – 0.26	2.45 - 5.77 – 0.25
Consumo de Energía [L/100km - gal/100mi – kWh/100km]	47.00 – 20.00 – 468.12	49.00 - 20.83 – 488.04
Norma de Emisiones	EURO 3	EURO 5

Si se considera que este tipo de unidades en el corto plazo reemplazan a las antiguas unidades de transporte público, y que en promedio su consumo es de 48 L/100km o 478.08 kWh/100km y una eficiencia de 2.50 km/L o 0.25 km/kWh, se puede determinar que el consumo energético por pasajero diario considerando las 29 líneas de transporte urbano que brindan el servicio de transporte en la ciudad es de 1.19 kWh/Pasajero según los datos obtenidos de la tabla 5.5.

Tabla 5.5. Consumo de Energía Diario para las Rutas del Transporte Público Urbano de Combustión Interna en la ciudad de Cuenca.

Fuente: Plan de Movilidad de Cuenca 2015-2025 [30] y Propia del Autor.

LÍNEA	Longitud de la Ruta [km]	Nro. Recorridos Diarios	Nro. Pasajeros Aprox.	Recorrido Diario [km]	Consumo de Combustible Diario [L]	Consumo de Energía Diario [kWh]	Energía Consumida por Pasajero [kWh/Pasajero]
2	29.87	6	717	179.22	86.03	856.81	1.20
3	37.00	6	977	222.00	106.56	1061.34	1.09
5	25.30	8	1174	202.40	97.15	967.63	0.82
6	48.60	11	1604	534.60	256.61	2555.82	1.59
7	37.55	7	1314	262.85	126.17	1256.63	0.96
8	33.15	7	998	232.05	111.38	1109.38	1.11
10	35.32	6	763	211.92	101.72	1013.15	1.33
12	36.21	7	1115	253.47	121.67	1211.79	1.09
13	43.35	4	572	173.40	83.23	828.99	1.45
14	25.34	7	976	177.38	85.14	848.02	0.87
15	32.76	6	708	196.56	94.35	939.71	1.33
16	43.45	7	1430	304.15	145.99	1454.08	1.02
17	36.23	6	522	217.38	104.34	1039.25	1.99
18	36.92	6	842	221.52	106.32	1059.04	1.26
19	27.58	6	629	165.48	79.43	791.13	1.26
20	35.18	6	802	211.08	101.31	1009.13	1.26



22	27.34	7	861	191.38	91.86	914.95	1.06
23	29.85	14	2048	417.90	200.59	1997.90	0.98
24	33.56	6	624	201.36	96.65	962.66	1.54
25	24.30	6	467	145.80	69.98	697.04	1.49
26	39.81	6	1242	238.86	114.65	1141.94	0.92
27	34.73	6	834	208.38	100.02	996.22	1.20
28	39.85	6	1004	239.10	114.77	1143.09	1.14
29	27.55	6	628	165.30	79.34	790.27	1.26
Alimentador 201	15.84	6	418	95.04	45.62	454.37	1.09
Alimentador 203	12.46	6	269	74.76	35.88	357.41	1.33
Troncal Norte	23.50	7	971	164.50	78.96	786.44	0.81
Troncal Sur	24.82	6	804	148.92	71.48	711.96	0.89
PROMEDIO	32.05	7	903.95	216.31	103.83	1034.15	1.19

5.4. Consumo y eficiencia energética de los sistemas de transporte eléctrico

La decisión de renovar las unidades de combustión interna por vehículos de tracción eléctrica surge a partir de la necesidad de descarbonizar la economía y mitigar los impactos ambientales generados por el uso del actual sistema de transporte público, propiciando la sustentabilidad económica, energética y ambiental del sector, incrementando la eficiencia y reduciendo el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de GEI. Es por ello que el Estado ecuatoriano, a través de la Ley Orgánica de Eficiencia Energética, expedida y vigente desde el 19 de marzo de 2019, exige el uso obligatorio de EV de uso público a partir del año 2025.

Con base en estos antecedentes, la Municipalidad de Cuenca busca incentivar el uso de medios de transporte público eléctricos como una alternativa eficiente, rentable y sustentable a los problemas del transporte público actual y conseguir un sistema de “movilidad integral” que reduzca los impactos económicos, sociales y ambientales generados por los medios de transporte de combustión interna y mejorar la calidad de vida de la ciudadanía en general.

Los medios de transporte de tracción eléctrica considerados en esta investigación, que si bien no se encuentran en operación comercial actualmente pero que en un futuro formarán parte del Sistema Integral de Transporte Público en la Ciudad de Cuenca son:



- El automóvil eléctrico.
- El autobús eléctrico.
- El Tranvía.
- Bicicletas eléctricas.

5.4.1. Modelo matemático para determinar la eficiencia energética de los sistemas de transporte eléctrico:

Para determinar la eficiencia energética del EV y BEB se ha adoptado el modelo matemático planteado en [11], el mismo que determina el consumo energético requerido para un recorrido específico en base al estado de carga inicial y final del banco de baterías (SOC). Este modelo fue calibrado para el autobús en estudio bajo las condiciones de operación de la ciudad de Cuenca. Para determinar el SOC se debe sumar o restar el SOC anterior y la variación que va a depender del escenario en el que se encuentre el autobús (aceleración en ascenso y descenso o desaceleración en ascenso y descenso), de la variación del nivel de altitud del recorrido y de la variación de la velocidad en ese tramo. Para un escenario de aceleración por ascenso o descenso, se considera una variación negativa del SOC de la batería, ya que el incremento del consumo energético disminuye el SOC de la batería, mientras que, para un escenario de desaceleración por ascenso o descenso, se considera una variación positiva del SOC de la batería, debido a la pequeña carga por acción del freno regenerativo propio del vehículo que actúa en estos casos.

Así el modelo matemático planteado para determinar el SOC_{ACTUAL} del banco de baterías se basa en la ecuación (1), en donde $E_{CONSUMO}$ representa una variable de consumo de energía estimado experimentalmente (0.01689), un ΔSOC que representa la variación del estado de carga de la batería que depende de una constante de escenario k , que de acuerdo al modelo planteado puede tomar los valores $k = -1$ para aceleración en ascenso, $k = 0.11$ para una desaceleración en ascenso, $k = -0.32$ para una aceleración en descenso y $k = 0.42$ para una desaceleración en descenso; y las variaciones de la velocidad de la unidad en ese tramo Δv y de la altura sobre el nivel del mar Δh :

$$SOC_{ACTUAL} = SOC_{ANTERIOR} + E_{CONSUMO} * \Delta SOC \quad (1)$$

En donde,

$$\Delta SOC = \pm k * \Delta v * \Delta h \quad (2)$$

A partir de estas ecuaciones se pretende determinar, con pruebas experimentales, la eficiencia energética del EV y BEB a través de distintas rutas comerciales y del tranvía.

5.4.2. Consumo y eficiencia energética del EV como taxi:

En el país, la ciudad de Loja fue la primera en contar con una cooperativa (Electri Loja Ecolosur S.A. “Ecotaxi”) que brinda los servicios de transporte público con una flota de 51 taxis eléctricos, 35 vehículos modelo E5 del fabricante BYD y 16 de la marca Kia Soul EV [7] como los de la figura 5.3. Otras ciudades como Quito y Guayaquil se están sumando a esta iniciativa con el objetivo de contribuir a una movilidad urbana sostenible. Así, en el mes de noviembre de 2019 la ciudad de Guayaquil, con el apoyo del Municipio, la Autoridad de Tránsito Municipal y el Gobierno Nacional, renovó parcialmente su flota de taxis por 50 unidades 100% eléctricas y se espera que en los próximos meses esta cifra ascienda a 200.



*Figura 5.3. Taxi Eléctrico BYD E5 y Vehículo Eléctrico KIA SOUL EV.
Fuente: Propia del Autor y cortesía del Ing. Luis Gonzáles Morales, PhD.*

Las características y especificaciones técnicas de los vehículos utilizados como unidades de taxi en el país se presentan a continuación en la tabla 5.6.

Tabla 5.6. Especificaciones Técnicas de los EV utilizados como Taxi en la ciudad de Loja.
Fuente: Taxis Eléctricos en la Ciudad de Loja – Ecuador [7].

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS		
DATOS		
Marca	BYD	KIA
Modelo	E5	SOUL EV
MOTOR		
Tipo	Síncrono de Imanes Permanentes (PMSM)	Síncrono de Imanes Permanentes (PMSM)
Autonomía [km]	305	167
Potencia [kW - hp]	160 – 215	81.4 – 109
Velocidad Máxima [km/h]	130	145
Torque [N.m]	310	285
BATERÍA		
Potencia [kW]	180	90
Energía [kWh]	48	27
Capacidad [Ah]	120	75
Voltaje en CC [V]	604.8	360
CARGADOR DE EMERGENCIA		
Potencia de Carga [kW]	1.5	5.6
CAPACIDAD		
Nro. de Pasajeros	5	5
RENDIMIENTO Y EFICIENCIA		
Eficiencia Energética [km/kWh]	6.54	7.87
Consumo de Energía [kWh/100km]	15.3	12.7

Si se considera que estas unidades transportan a la misma cantidad de pasajeros (2), realizan la misma cantidad de carreras (30) y recorren la misma distancia promedio en una carrera (3.92 km) en relación a las unidades de combustión interna, el consumo por carrera sería aproximadamente de 15.82 kWh/100km y por pasajero 0.31 kWh/pasajero con una eficiencia energética de 6.32 km/kWh para el BYD E5, mientras que para el Kia Soul EV el consumo por carrera sería aproximadamente de 13.26 kWh/100km y por pasajero 0.27 kWh/pasajero con una eficiencia energética de 7.54 km/kWh, información que se resume en la tabla 5.7. Esta diferencia en la eficiencia de los vehículos estudiados se debe principalmente al peso que implica disponer un banco de baterías de mayor capacidad y por consiguiente autonomía del BYD E5, aspecto que se prioriza habitualmente en los vehículos eléctricos, además ésta eficiencia también es reducida por el aumento de peso que implica disponer una mayor capacidad de almacenamiento en el maletero de 460 L para el BYD contra los 281 L del Kia Soul estudiado.



Tabla 5.7. Consumo y eficiencia energética aproximada por carrera de un taxi eléctrico en la ciudad de Cuenca.
Fuente: Propia del Autor.

Vehículo	Consumo de Energía por Carrera [kWh]	Distancia por Carrera [km]	Consumo de Energía [kWh/100km]	Eficiencia Energética [km/kWh]	Energía consumida por Pasajero [kWh/Pasajero]
BYD E5	0.62	3.92	15.82	6.32	0.31
KIA SOUL EV	0.54	3.92	13.26	7.54	0.27

5.4.3. Consumo y eficiencia energética del EV como taxi en la ruta del tranvía:

Para determinar el consumo y la eficiencia energética del EV en la ruta del tranvía se utilizó el Kia Soul EV del Laboratorio de Microrredes de la Universidad de Cuenca.

Se realizó el recorrido de la figura 5.4, simulando una carrera en dicha ruta y en un horario de alta demanda vehicular en el tráfico de la ciudad (16h30). Dentro de las novedades que se presentaron al realizar el recorrido es que no se pudo realizarlo de forma exacta ya que existen sectores destinados para el tránsito exclusivo del tranvía, principalmente en el centro histórico, por lo que se tuvo que desviar los recorridos por calles contiguas tratando de mantener la ruta tranviaria.

En el recorrido de ida el desvío se presentó a la altura de la calle Gran Colombia y Octavio Cordero en donde no está permitido el ingreso de vehículos siendo un tramo exclusivo para el tránsito del tranvía, por tal motivo se tomó las calles Octavio Cordero, Gaspar Sangurima, Coronel Talbot para retornar a la ruta tranviaria en la calle Gran Colombia. El desvío fue de aproximadamente 235 m.

En el recorrido de vuelta el primer desvío se produjo a la altura de la Av. Huayna Cápac y Gaspar Sangurima por donde va la ruta tranviaria y no está permitido la circulación vehicular, por lo que se tuvo que recorrer la Av. Huayna Cápac, Mariscal Lamar, Mariano Cueva, Simón Bolívar, Hermano Miguel y retornar a la ruta en la calle Mariscal Lamar.

El segundo desvío se produjo en la calle Mariscal Lamar a la altura de la intersección con la calle Tarqui, cambiando el recorrido por esa calle hasta la Antonio Vega Muñoz y tomando las calles Juan Montalvo, Simón Bolívar, Estévez de Toral y retornando a la ruta en la calle Mariscal Lamar. El tercer desvío se produjo en la calle Mariscal Lamar y Av. de las Américas por lo que

se tuvo que tomar la avenida hasta el retorno en la intersección con la calle Alfonso Andrade para incorporarse a la ruta a la altura de la Av. del Tejar. El desvío total en el recorrido de vuelta fue de 2,350 m.



Figura 5.4. Recorrido de la Ruta Tranviaria realizado con el Kia Soul EV
Fuente: Propia del Autor.

La ruta del recorrido total realizada en relación a la ruta tranviaria (20,362 m) ha tenido un desvío de aproximadamente 2,585 m considerando los desvíos en los recorridos de ida y vuelta que equivalen a un 12.7% del total. El tiempo total empleado para realizar el recorrido fue de 1 hora y 28 minutos aproximadamente. El perfil de elevación y velocidad de la ruta del tranvía se observa en la figura 5.5, de donde se evidencia que el máximo punto de elevación de la ruta está a 2,613 msnm y el mínimo a 2,512 msnm dando una diferencia de 101 msnm. El recorrido se realizó a una velocidad promedio de 20 km/h debido al elevado tráfico y congestión vehicular, y un máximo de 76 km/h en un determinado tramo.

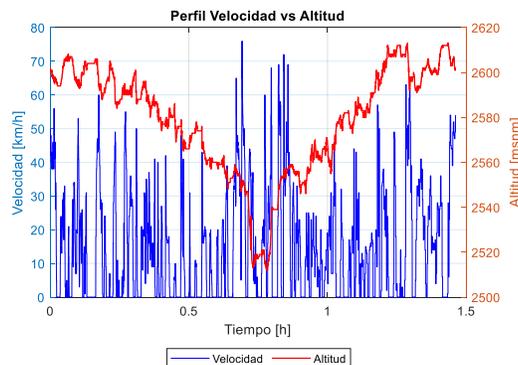


Figura 5.5. Perfil de Elevación y Velocidad en la Ruta del Tranvía.
Fuente: Propia del Autor.

El perfil de la variación del SOC de la batería y del consumo energético del recorrido se observa en la figura 5.6, en donde se indica que se inició con un SOC del 97% para concluir con un 85.50%, arrojando un consumo del 11.50% de la energía disponible en la batería del vehículo, es decir, aproximadamente 3.01 kWh, considerando que la energía eléctrica almacenada en la batería alcanza los 27 kWh a plena carga. De la energía disponible en la batería, el vehículo consumió 5.40 kWh y recargó a través de su freno regenerativo 2.10 kWh, dando un consumo energético de 3.30 kWh, que concuerda con el consumo obtenido a partir de la diferencia del SOC de la batería producto del recorrido de la ruta.

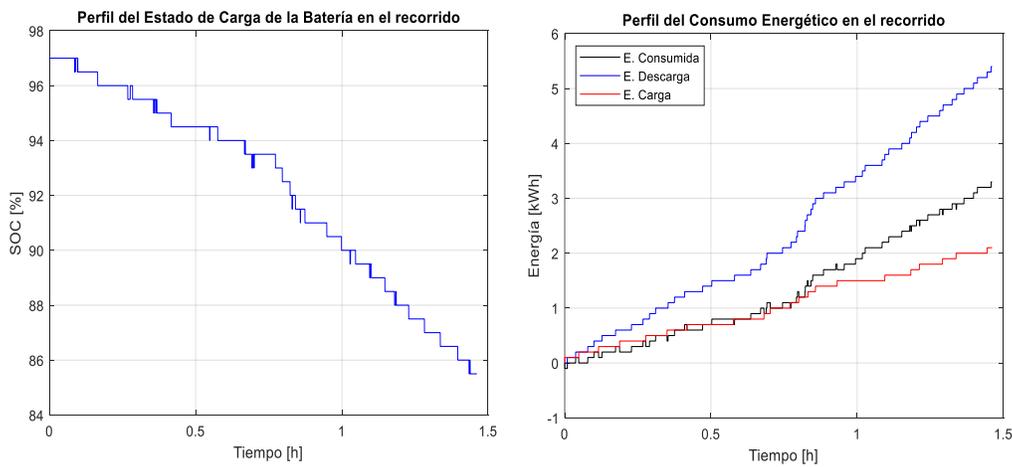


Figura 5.6. Perfil del Estado de Carga y Consumo Energético del Kia Soul EV en el Recorrido de la Ruta Tranviaria.
Fuente: Propia del Autor.

De acuerdo con los datos obtenidos de la prueba, se puede determinar que el consumo energético del vehículo Kia Soul EV en la ruta del tranvía es de 14.38 kWh/100 km y de 3.30 kWh/pasajero, para una eficiencia energética de 6.95 km/kWh, valores que se resumen en la tabla 5.8.

Tabla 5.8. Consumo y Eficiencia Energética del Automóvil Eléctrico Kia Soul EV en la Ruta del Tranvía.
Fuente: Propia del Autor.

Recorrido	Distancia [km]	Tiempo [h]	Energía Consumida [kWh]	Consumo Energético [kWh/100km]	Eficiencia Energética [km/kWh]	Nro. Pasajeros a bordo.	Energía por Pasajero [kWh/Pasajero]
Ruta Tranvía	22.952	1.47	3.30	14.38	6.95	1	3.30

5.4.4. Consumo y eficiencia energética del BEB:

La empresa BYD-E Motors Ecuador S.A. por gestión de la Alcaldía de Cuenca y el aval técnico de la Universidad de Cuenca puso en operación durante el mes de febrero de 2018 una unidad eléctrica modelo K9FE similar al de la figura 5.7, con el objetivo de someterlo a diferentes pruebas técnicas y establecer la factibilidad de su incursión en el sistema de transporte público actual de la ciudad. Esta unidad realizó un total de 6 recorridos cubriendo una distancia promedio de 96 km por día por zonas de atracción turística con una duración aproximada de 1 hora con 10 minutos por recorrido.



Figura 5.7. Autobús Eléctrico Modelo K9FE del fabricante BYD.
Fuente: Cortesía del Ing. Luis González Morales, PhD.

Desde el 07 de diciembre de 2018 hasta el 15 de febrero de 2019 otra unidad que se observa en la figura 5.8, modelo K9G de la misma empresa BYD inició su operación comercial en la ciudad de Cuenca realizando los mismos recorridos de las rutas 5, 1B, 20, 27 y 100 que realiza una unidad convencional de transporte público, como parte de las pruebas técnicas a las que fue sometido para establecer su factibilidad y condiciones de integración en el sistema de Transporte Público actual.



Figura 5.8. Autobús Eléctrico Modelo K9G del fabricante BYD.
Fuente: Cortesía del Ing. Luis González Morales, PhD.



Las especificaciones técnicas de la unidad facilitadas por el fabricante se detallan en la tabla 5.9.

Tabla 5.9. Especificaciones Técnicas del Autobús Eléctrico BYD K9G.

Fuente: Informe de estudio de eficiencia energética autobús eléctrico (Comportamiento en ruta comercial del autobús eléctrico BYD modelo K9G) [45].

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
DATOS	
Marca	BYD
Modelo	K9G
Combustible	Electricidad
MOTOR	
Tipo	AC Síncrono de Imanes Permanentes
Modelo	BYD - 2912TZ-XY-A
Potencia Máxima [kW - hp]	150 x 2 - 201 x 2
Torque Máximo [N.m]	550 x 2
Autonomía [km]	300
Velocidad Máxima [km/h]	80
CAPACIDAD	
Nro. de Pasajeros	80
Área útil para pasajeros de pie [m ²]	8
RENDIMIENTO Y EFICIENCIA	
Eficiencia Energética [km/kWh]	0.93
Consumo de Energía [KWh/100km]	108

Una de las partes esenciales del autobús la conforma el banco de baterías compuesto por un conjunto de 63 módulos de hierro-fosfato patentadas por el fabricante BYD con un período de vida útil de 30 años. Las características técnicas se detallan en la tabla 5.10:

Tabla 5.10. Especificaciones Técnicas del Banco de Baterías del Autobús Eléctrico BYD K9G.

Fuente: Informe de estudio de eficiencia energética autobús eléctrico (Comportamiento en ruta comercial del autobús eléctrico BYD modelo K9G) [45].

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL BANCO DE BATERÍAS	
Nro. De Packs en paralelo	3
Módulos	63 (C12_8S)
Tipo de Conexión	21 Módulos conectados en serie formando un pack
Energía [kWh]	310
Capacidad [Ah]	6000
Voltaje en CC [V]	540 (2-3.8 por celda)
Voltaje de Operación [V]	336 - 638

El proceso de recarga del banco de baterías se lo llevó a cabo en las instalaciones del laboratorio de Microrred de la Universidad de Cuenca mediante una electrolinera proporcionada por BYD que se la observa en la figura 5.9, abastecida por un transformador trifásico marca Inatra de 100 kVA el mismo que presenta las especificaciones técnicas de operación indicadas en la tabla 5.11. Las características técnicas de la electrolinera se resumen en la tabla 5.12.

Tabla 5.11. Especificaciones Técnicas del Transformador

Fuente: Informe de estudio de eficiencia energética autobús eléctrico (Comportamiento en ruta comercial del autobús eléctrico BYD modelo K9G) [45].

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL TRANSFORMADOR	
TIPO	Seco
CAPACIDAD [kVA]	100
GRUPO DE CONEXIÓN	ynD5
TENSIÓN NOMINAL [V]	440 / 254 / 220

Tabla 5.12. Especificaciones Técnicas de la Estación de Carga modelo EVA080KI/01 proporcionada por BYD.

Fuente: Estimación de la energía requerida para la sustitución de la flota de autobuses públicos por autobuses eléctricos de la Ciudad de Cuenca [11].

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA ESTACIÓN DE CARGA MODELO EVA080KI/01	
Potencia de Carga Nominal [kW]	40 x 2
Conector de la Pistola de Carga	AC Estándar Europeo
Número de Pistolas de Carga	2
Tiempo de Carga [h]	4 - 5
Tensión de Carga [V]	440
Frecuencia de Carga [Hz]	60



Figura 5.9. Estación de Carga del fabricante BYD.

Fuente: Informe de estudio de eficiencia energética autobús eléctrico (Comportamiento en ruta comercial del autobús eléctrico BYD modelo K9G) [45].



Según se describe en [11], se ha podido plantear experimentalmente el modelo matemático a partir de los datos recolectados de los recorridos realizados por la unidad en las rutas de las líneas 27 (Sinincay-Huizhil) y 100 (Ricaurte-Baños) durante el período de pruebas técnicas y establecer un modelo que permita determinar el consumo y la eficiencia energética aproximada del BEB para la operación comercial en las distintas rutas comerciales.

Los datos obtenidos de una vuelta completa a la ruta de las líneas especificadas se presentan en la tabla 5.13, en donde se evidencia que la eficiencia energética de la unidad depende de diversos factores como la distancia recorrida, variación de la altitud en el recorrido, velocidad de viaje, utilización de equipos que puedan consumir energía como la radio, luces, limpiaparabrisas y otros, pero principalmente el estilo y agresividad de conducción del chofer. El valor de la eficiencia que más se acerca al valor referencial presentado por el fabricante (0.93 km/kWh) es el de la línea 100 (0.88 km/kWh) debido a que la distancia recorrida y la variación de altitud del recorrido es menor que el de la línea 27. De este análisis se ha podido determinar un consumo energético de 183 kWh/100km y 0.36 kWh/pasajero, y una eficiencia de 0.70 km/kWh para el recorrido de la línea 27 y un consumo de 114 kWh/100km y 0.19 kWh/pasajero, y una eficiencia de 0.88 km/kWh para el de la línea 100, aproximadamente.

Tabla 5.13. Resultados de la Prueba del recorrido del BEB BYD K9G en las Rutas de las Líneas 27 y 100.
Fuente: Informe de estudio de eficiencia energética autobús eléctrico (Comportamiento en ruta comercial del autobús eléctrico BYD modelo K9G) [45].

Recorrido	Distancia [km]	Tiempo [h]	Energía Consumida [kWh]	Consumo Energético [kWh/100km]	Eficiencia Energética [km/kWh]	Nro. Pasajeros Aprox.	Energía por Pasajero [kWh/Pasajero]
Línea 27	44.23	2.54	63.56	183	0.70	177	0.36
Línea 100	36.77	2.26	41.89	114	0.88	217	0.19

Adicionalmente, y según [11], aplicando el modelo matemático anteriormente descrito para determinar la eficiencia energética del autobús eléctrico por recorrido en cada una de las 29 rutas comerciales del transporte público urbano, se han obtenido que en promedio el consumo energético es de 132.62 kWh/100km y 0.32 kWh/Pasajero y una eficiencia energética de 0.78 km/kWh.

5.4.5. Consumo y eficiencia energética del BEB en la ruta del tranvía:

Mediante el modelo matemático planteado se pretende determinar la eficiencia energética del BEB aproximando el consumo energético del autobús a través de la ruta tranviaria, a partir de la obtención de un modelo del perfil del SOC de la batería. Para ello se ha considerado el perfil de elevación y de velocidad de la ruta mostrado en la figura 5.10, simulando el recorrido de un autobús en operación comercial con el objeto de determinar el escenario en el que se encontraría el autobús en el recorrido y de esta manera cuantificar la variación del SOC de la batería en función de estos parámetros. El recorrido se realizó en el EV Kia Soul EV del Laboratorio de Microrred de la Universidad de Cuenca a lo largo de la ruta, sin embargo, cabe la pena reiterar que no se pudo seguirla en su totalidad ya que existen sectores destinados para el tránsito exclusivo del tranvía, principalmente en el centro histórico, por lo que se tuvo que desviar los recorridos por calles contiguas tratando de mantener la ruta tranviaria. El recorrido realizado es idéntico al mostrado en la figura 5.4, y el tiempo total empleado para realizar el recorrido fue de 1 hora y 28 minutos aproximadamente en un horario (16h15) de alto tráfico y congestión vehicular por las calles del recorrido.

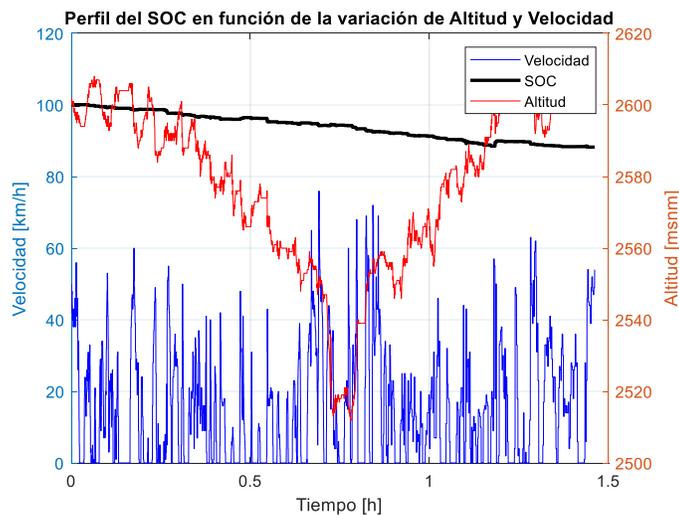


Figura 5.10. Perfil del Estado de Carga SOC en función de la variación de la altitud y velocidad del recorrido.
Fuente: Propia del Autor.

En la figura 5.11 se observa el Perfil del SOC en función de la variación de la altitud y velocidad en el recorrido de la ruta tranviaria determinado mediante el modelo matemático planteado. El



SOC final es de 88.23%, es decir, se ha consumido un 11.77% de la energía almacenada en las baterías para realizar el recorrido, que equivale a 36.49 kWh. En base a estos resultados, y de acuerdo a lo establecido en la tabla 5.14, se tiene que el BEB puede realizar aproximadamente 8 recorridos totales diarios (ida y vuelta) en la ruta del tranvía iniciando su operación con su batería a plena carga, consumiendo 159 kWh/100km y con una eficiencia de 0.63 km/kWh aproximadamente. Si además se considera de acuerdo al reporte de la unidad ejecutora del proyecto Tranvía, en donde se informa que el promedio de pasajeros por unidad que acogió el tranvía en su período de pruebas en el mes de marzo de 2019 fue de 133, se establece que el consumo por pasajero sería de 0.27 kWh/pasajero.

Tabla 5.14. Consumo y Eficiencia Energética obtenido mediante el modelo matemático para el BEB en la Ruta Tranviaria.

Fuente: Propia del Autor.

Recorrido	Distancia [km]	Tiempo [h]	Energía Consumida [kWh]	Consumo Energético [kWh/100km]	Eficiencia Energética [km/kWh]	Energía Consumida por Pasajero [kWh/Pasajero]
Ruta Tranviaria con desvíos	22.952	1.46	36.49	159	0.63	0.27

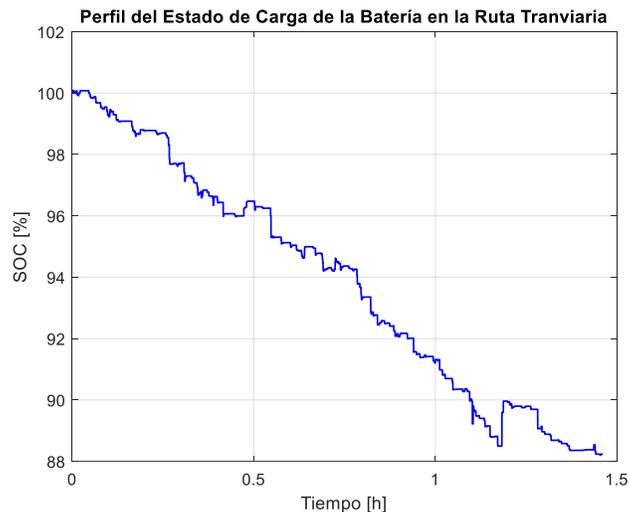


Figura 5.11. Perfil del Estado de Carga SOC del modelo matemático para el autobús eléctrico en la ruta tranviaria. Fuente: Propia del Autor.



5.4.6. Consumo y eficiencia energética de la bicicleta eléctrica:

En la actualidad el uso de la bicicleta en la ciudad está relacionado con el deporte y el placer, y en menor medida con el transporte. Sin embargo, en [46] se demuestra que es factible la implementación de la bicicleta eléctrica en los próximos años como una alternativa de movilidad sostenible en el ciudad en función de las necesidades de transporte, principalmente en las rutas de los alimentadores del proyecto tranvía para que se incorporen dentro de un esquema integral de movilidad. En este estudio se ha utilizado una bicicleta con kit de asistencia eléctrico con las características eléctricas que se presenta en la tabla 5.15:

Tabla 5.15. Especificaciones Técnicas de la Bicicleta Eléctrica utilizada en el estudio.

Fuente: Implementación de la bicicleta eléctrica como alternativa de movilidad en la ciudad de Cuenca. Seminario Internacional “Hacia una Movilidad Sostenible” [46].

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA BICICLETA ELÉCTRICA UTILIZADA EN EL ESTUDIO	
Voltaje de Alimentación [VDC]	36
Voltaje de Motor [VCA]	25
Potencia Nominal [W]	500
Torque Nominal [N.m]	22.7
Capacidad de la Batería [Ah]	14.25
Energía en la Batería [Wh]	515
Corriente máxima de Carga [A]	4
Tiempo Máximo de Carga [h]	4

Los resultados del estudio en mención indican que las bicicletas eléctricas en distintas rutas dentro del perímetro urbano entregan en promedio una autonomía de 27.78 km, un consumo energético de 1,72 kWh/100km con una eficiencia de 57.88 km/kWh.

Tabla 5.16. Consumo y Eficiencia Energética obtenido de la Bicicleta Eléctrica de Prueba en la ciudad.

Fuente: Implementación de la bicicleta eléctrica como alternativa de movilidad en la ciudad de Cuenca. Seminario Internacional “Hacia una Movilidad Sostenible” [46].

Recorrido	Distancia [km]	Energía Consumida [kWh]	Consumo Energético [kWh/100km]	Eficiencia Energética [km/kWh]	Energía Consumida por Pasajero [kWh/pasajero]
Rutas en el perímetro urbano	27.78	0.48	1.72	57.88	0.48

5.5. Consumo y eficiencia energética de la etapa de pruebas del sistema tranviario

Durante los meses de enero a abril de 2019 se realizaron distintas pruebas técnicas de operación del sistema tranvía, realizando recorridos de capacitación a conductores, marchas en blanco (sin pasajeros) y pruebas de las unidades con pasajeros en la etapa de capacitación de los potenciales usuarios. Así a partir del día 08 y durante todo el mes de marzo de 2019 inicia el período de pruebas con pasajeros del sistema tranviario con motivo de capacitación a los usuarios.

De acuerdo con los datos expuestos en la figura 5.12 y que fueron proporcionados por la Unidad Ejecutora del Proyecto Tranvía de Cuenca, se registraron un total de 32,377 pasajeros en 550 recorridos que iniciaron a las 08h00 y culminaron a las 20h00 con un período de receso de dos horas entre las 12h00 a 14h00, repartidos entre las 7 unidades en total que brindaron el servicio durante este período. Se presentó la mayor cantidad de usuarios (2,891) y recorridos (38) en el día 30. Dentro de las novedades operativas de este período de pruebas cabe la pena mencionar que el día sábado 09 y domingo 10 de marzo se suspenden los recorridos por un accidente en la plataforma tranviaria y el domingo 24 se suspenden los recorridos desde las 11h15 hasta las 19h00 por votaciones.

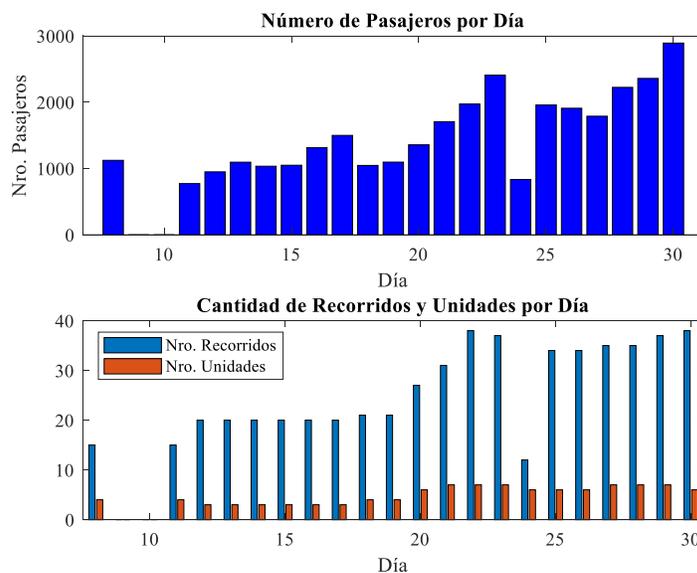


Figura 5.12. Comportamiento de Pasajeros, Recorridos y Unidades durante el Período de Prueba.
Fuente: Unidad Ejecutora del Proyecto Tranvía de Cuenca.

5.5.1. Consumo energético diario:

En la figura 5.13, se observa el consumo energético diario del período de pruebas del sistema tranviario. Se evidencia un comportamiento regular alcanzando aproximadamente en promedio los 5.86 MWh de consumo energético propio de la tracción del tranvía, instalaciones en paradas, servicios auxiliares, tracción e instalaciones en cocheras y talleres, a excepción de los primeros días del mes (semana del 08 al 17 de marzo) en donde el consumo alcanzó en promedio los 5.25 MWh y del 24 de marzo en donde la operación de las unidades del tranvía fue irregular siendo su consumo de 5.1 MWh. El consumo energético en el período de tracción del tranvía (08h00 a 20h00) es de aproximadamente 3.22 MWh, mientras que en el período en el que no se realizaron recorridos (22h00 a 08h00) se determinó un consumo aproximado de 1.37 MWh.

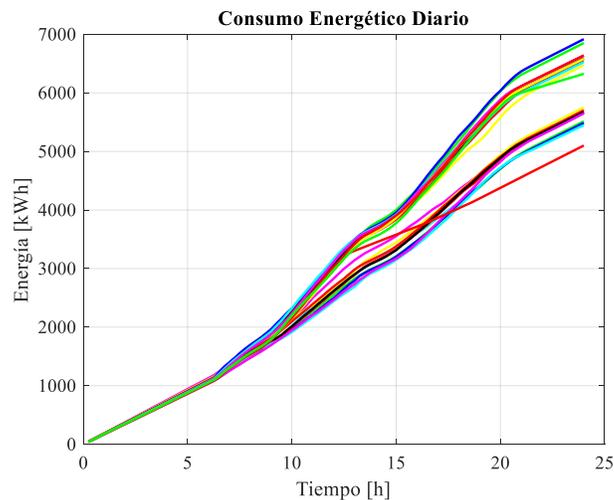


Figura 5.13. Consumo Energético Diario del Sistema Tranviario en el Período de Pruebas.
Fuente: Unidad Ejecutora del Proyecto Tranvía de Cuenca.

Si se considera que en un escenario inicial el consumo energético de la tracción de las unidades representa un 59% del total, las instalaciones en paradas el 8%, servicios auxiliares el 10%, tracción en cocheras y talleres 7% y las instalaciones en cocheras y talleres 16%, se tiene que el consumo energético es de 3.220 kWh para la tracción, 488 kWh para las instalaciones en las distintas paradas, 585 kWh para los servicios auxiliares, 406 kWh para la tracción en cocheras/talleres y 911 kWh para las instalaciones en cocheras/talleres en el período de pruebas del sistema tranviario, situación que se resume en la figura 5.14.

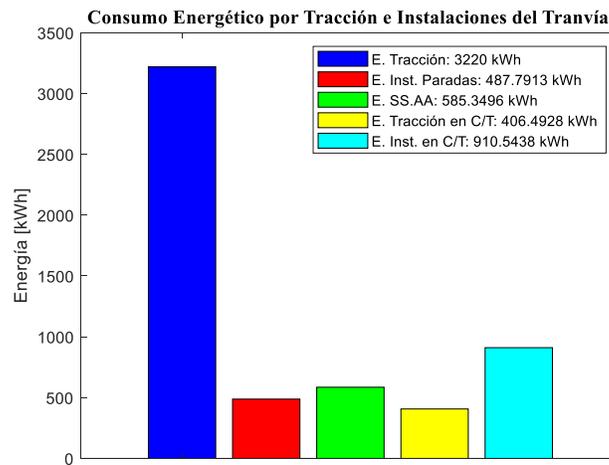


Figura 5.14. Consumo Energético Diario por Tracción e Instalaciones del Sistema Tranviario en el Período de Pruebas.

Fuente: Unidad Ejecutora del Proyecto Tranvía de Cuenca.

5.5.2. Perfil de Demanda Diario:

En la figura 5.15 se observa el perfil de demanda diario del período de pruebas del sistema tranviario. Se evidencia un comportamiento similar en la mayor parte de días, de cual se distingue que la operación (tracción) de la unidades del tranvía se produjo entre las 08h00 y 20h00, a excepción de la semana inicial de operación (semana del 08 al 17 de marzo) en donde la demanda máxima aproximada es de 364 kW y la del día 24 de marzo alcanzando una demanda de 431 kW en el período en el que se realizaron las pruebas que fue de 09h30 hasta las 11h30, a partir del cual la demanda cae hasta los 140 kW que se debe únicamente a las instalaciones en paradas. La demanda máxima del sistema tranviario en este período es de 479.47 kW correspondiente al sábado 23 de marzo en donde se registra el mayor consumo energético alcanzando los 6.92 MWh. De la figura 5.15 también se puede evidenciar que entre las 12h00 y 14h00 existe una caída de la demanda debido a que en ese período de tiempo no se realizaron recorridos por descanso para el almuerzo de los choferes y demás personal operativo. Desde las 22h00 hasta las 06h00 del siguiente día se observa que la demanda es de aproximadamente 180 kW debido únicamente a las instalaciones en paradas. A partir de las 06h00 hasta las 08h00 que se inician los recorridos y desde las 20h00 hasta las 22h00 en donde culminan los recorridos la demanda se debe no solo a las instalaciones de paradas sino también a la tracción e instalaciones en cocheras y talleres y servicios auxiliares.

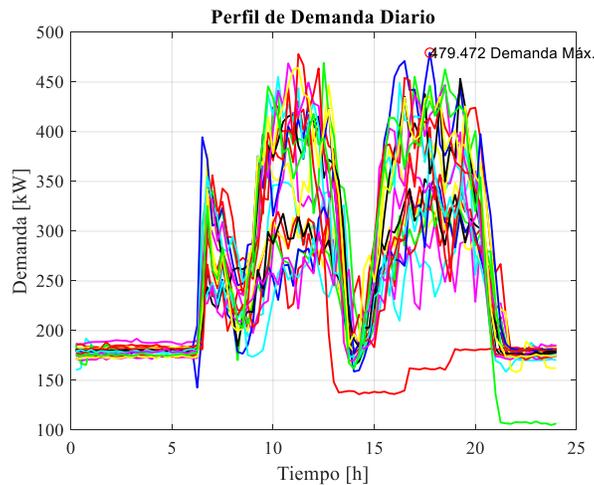


Figura 5.15. Perfil de Demanda Diario del Sistema Tranviario en el Período de Pruebas.
Fuente: Unidad Ejecutora del Proyecto Tranvía de Cuenca.

5.5.3. Consumo energético y demanda diaria típicos de prueba:

Para tener una mejor apreciación del comportamiento del consumo energético y la demanda diaria del sistema tranviario en el período de pruebas, se han tomado como referencia el día 23 en donde se registró el mayor consumo energético y demanda y el día 30 de marzo en donde se registró la mayor cantidad de pasajeros a bordo de las unidades y de recorridos. En ambos casos, se observa un comportamiento muy similar tanto en su consumo energético como en su perfil de demanda de acuerdo a la figura 5.16, por lo que se considerará como referencia para las simulaciones de operación de pruebas del sistema tranviario en los siguientes análisis del estudio.

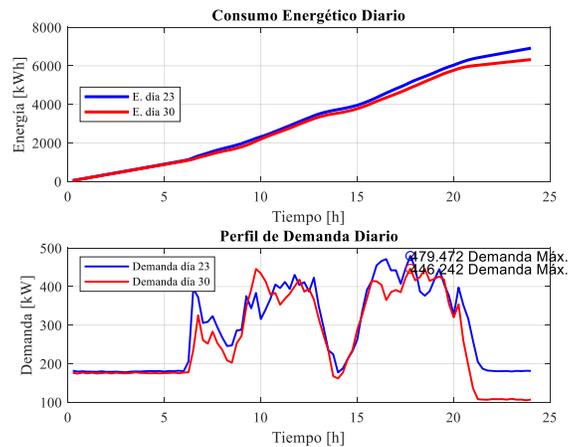


Figura 5.16. Consumo Energético y Perfil de Demanda Diario de los días 23 y 30 de marzo.
Fuente: Unidad Ejecutora del Proyecto Tranvía de Cuenca.



5.5.4. Consumo y eficiencia energética del tranvía:

En la tabla 5.17, se registra el consumo energético en los periodos de demanda media (07h00 a 18h00) y punta (18h00 a 22h00) y la eficiencia energética para cada uno de los días de prueba de acuerdo a las características operativas y técnicas propias del proceso. En promedio se ha determinado un total de 1,542 pasajeros que utilizaron el sistema tranviario, demandando 410 kW de potencia y 6.06 MWh de energía eléctrica diaria durante el período de pruebas con pasajeros.

Tabla 5.17. Consumo y Eficiencia Energética del Tranvía en el período de Pruebas.
Fuente: Unidad Ejecutora del Proyecto Tranvía de Cuenca y Propia del Autor.

Día y Fecha	Nro. Pasajeros	Nro. Recorridos	Nro. Unidades	Distancia Total Recorrida [km]	Demanda [kW]	Energía Registrada [kWh]	Consumo de Energía [kWh/100km]	Eficiencia Energética [km/kWh]	Energía por Pasajero [kWh/Pasajero]
viernes. 08 de marzo	1123	15	4	1221.72	350	5492	450	0.22	4.89
lunes. 11 de marzo	772	15	4	1221.72	419	5669	464	0.22	7.34
martes. 2 de marzo	949	20	3	1221.72	364	5752	471	0.21	6.06
miércoles. 13 de marzo	1095	20	3	1221.72	332	5703	467	0.21	5.21
jueves. 14 de marzo	1034	20	3	1221.72	342	5514	451	0.22	5.33
viernes. 15 de marzo	1049	20	3	1221.72	356	5486	449	0.22	5.23
sábado. 16 de marzo	1313	20	3	1221.72	346	5653	463	0.22	4.31
domingo. 17 de marzo	1499	20	3	1221.72	352	5672	464	0.22	3.78
lunes. 18 de marzo	1046	21	4	1710.41	375	5448	319	0.31	5.21
martes. 19 de marzo	1096	21	4	1710.41	367	5650	330	0.30	5.16
miércoles. 20 de marzo	1357	27	6	3298.64	426	6472	196	0.51	4.77
jueves. 21 de marzo	1706	31	7	4418.55	447	6558	148	0.67	3.84
viernes. 22 de marzo	1972	38	7	5416.29	469	6851	126	0.79	3.47
sábado. 23 de marzo	2407	37	7	5273.76	479	6916	131	0.76	2.87
domingo. 24 de marzo	834	12	6	1466.06	431	5101	348	0.29	6.12
lunes. 25 de marzo	1957	34	6	4153.85	438	6589	159	0.63	3.37
martes. 26 de marzo	1908	34	6	4153.85	455	6524	157	0.64	3.42
miércoles. 27 de marzo	1788	35	7	4988.69	469	6635	133	0.75	3.71
jueves. 28 de marzo	2223	35	7	4988.69	478	6581	132	0.76	2.96
viernes. 29 de marzo	2358	37	7	5273.76	464	6640	126	0.79	2.82
sábado. 30 de marzo	2891	38	6	4642.54	446	6324	136	0.73	2.19
PROMEDIO	1542	26	5	2917.58	410	6059	291	0.46	4.38



Sin embargo, no todos los días tuvieron las mismas condiciones operativas, por lo que, para el presente estudio, se consideraron únicamente aquellos en los que la operación del sistema tranviario se asemejaría a su operación comercial real. Como criterio de selección se ha considerado aquellos con más o igual a 20 recorridos y con más de mil pasajeros transportados al día, quedando fuera del análisis los datos de los días 8, 11, 12, 13, 14, 15 y 24 de marzo respectivamente.

En la tabla 5.18 se observan los resultados del análisis para determinar el consumo y eficiencia energética por unidad tranviaria en los días seleccionados, de donde se obtiene que, en el período de pruebas del sistema tranviario, el consumo energético de una unidad en un recorrido (ida y vuelta) es de 215.77 kWh/100km, con una eficiencia energética de 0.58 km/kWh y requiriendo 3.71 kWh por cada pasajero que se moviliza en una unidad del tranvía al día.

Comparando con datos de consumo energético por viajero del tranvía Citadis 302 de Barcelona que según [47], es de 0.12 kW/pasajero.km o 2.75 kW/pasajero, considerando la longitud de 22.952 km de la ruta tranviaria se obtiene resultados acordes a la realidad corroborando la validez de la información proporcionada en este estudio.

Tabla 5.18. Consumo y Eficiencia Energética diaria por recorrido de una unidad del Tranvía en el período de Pruebas.

Fuente: Propia del Autor.

Día y Fecha	Distancia [km]	Energía Total Registrada [kWh]	Consumo de Energía [kwh/100km]	Eficiencia Energética [km/kWh]	Nro. Pasajeros	Energía por Pasajero [kWh/Pasajero]
sábado, 16 de marzo	20.36	94.22	463	0.22	22	4.31
domingo, 17 de marzo	20.36	94.53	464	0.22	25	3.78
lunes, 18 de marzo	20.36	64.85	319	0.31	12	5.21
martes, 19 de marzo	20.36	67.26	330	0.30	13	5.16
miércoles, 20 de marzo	20.36	39.95	196	0.51	8	4.77
jueves, 21 de marzo	20.36	30.22	148	0.67	8	3.84
viernes, 22 de marzo	20.36	25.76	126	0.79	7	3.47
sábado, 23 de marzo	20.36	26.70	131	0.76	9	2.87
lunes, 25 de marzo	20.36	32.30	159	0.63	10	3.37
martes, 26 de marzo	20.36	31.98	157	0.64	9	3.42
miércoles, 27 de marzo	20.36	27.08	133	0.75	7	3.71
jueves, 28 de marzo	20.36	26.86	132	0.76	9	2.96
viernes, 29 de marzo	20.36	25.64	126	0.79	9	2.82
sábado, 30 de marzo	20.36	27.74	136	0.73	13	2.19
PROMEDIO	20.36	43.94	215.77	0.58	11.60	3.71

5.6. Comparación de consumo y eficiencia energética entre los sistemas de transporte público analizados

Realizando una comparación de los valores obtenidos del consumo y eficiencia energética de los medios de transporte que podrían conformar el sistema integral de transporte público de la ciudad de Cuenca analizados en el presente estudio, se han obtenido los resultados mostrados en la figura 5.17. Para el caso de las unidades de taxi, en donde los ICE presentan un consumo energético mayor en un 939%, una eficiencia menor en aproximadamente 949% y un consumo energético por pasajero mayor en un 924% en relación a los EV, que resultan más eficientes con un menor consumo energético en un día ordinario de trabajo. Por esta razón, los EV deben en un futuro reemplazar a los ICE por todos los beneficios que su utilización significaría no solo en el ámbito energético, sino también ecológico y económico. De acuerdo a los datos de la figura 5.17, el vehículo con un menor consumo y con una mayor eficiencia es el Kia Soul EV en relación al también eléctrico taxi eléctrico BYD E5; sin embargo, una de sus principales desventajas es su autonomía, ya que requeriría recargas parciales en el día para cumplir con el recorrido diario de aproximadamente 360 km, no así el BYD E5 que proporciona una autonomía capaz de cumplir con el recorrido con una sola carga de su batería al día.

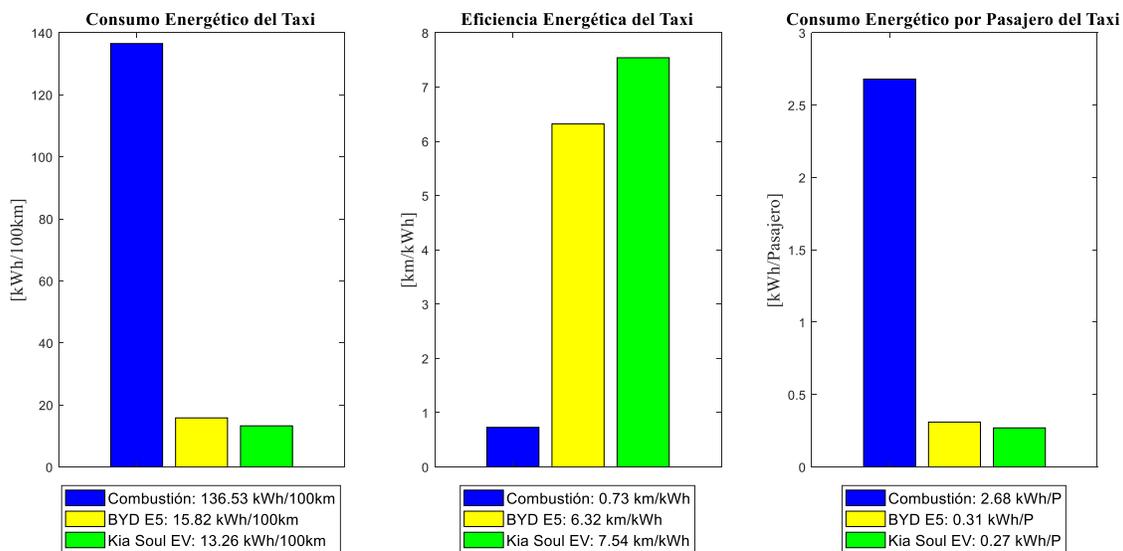


Figura 5.17. Comparación del Consumo y Eficiencia Energética del Taxi en un día de trabajo en la ciudad de Cuenca.

Fuente: Propia del Autor.

En relación a los autobuses de combustión interna actuales y los de tracción eléctrica que en un futuro podrían entrar en operación comercial en la ciudad, los valores de consumo y eficiencia energética en promedio para todas las rutas se muestran en la figura 5.18. Se observa que el autobús de combustión interna presenta un consumo energético mayor en un 361%, una eficiencia menor en 312% y un consumo energético por pasajero mayor al 372% en comparación con el eléctrico, por lo que también debería considerarse el reemplazo de la flota de buses actual por unidades de tracción eléctrica por todos los beneficios que su utilización representa para la ciudad y el país, al ser el sector transporte el de mayor demanda de combustibles fósiles en la actualidad.

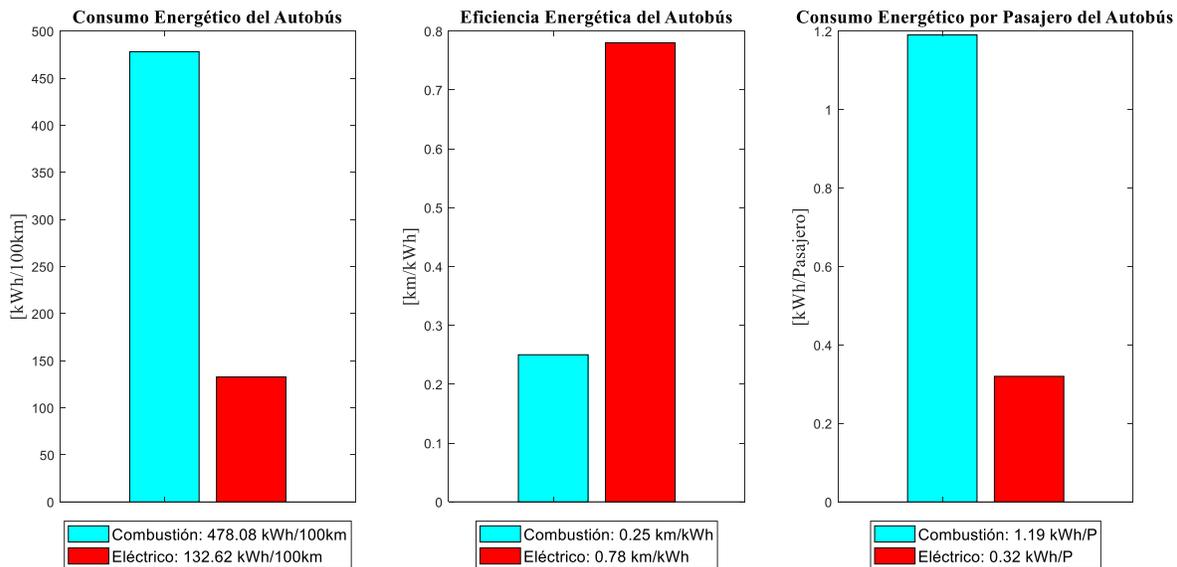


Figura 5.18. Comparación del Consumo y Eficiencia Energética del Autobús en un día de trabajo en la ciudad de Cuenca.

Fuente: Propia del Autor.

Haciendo una relación similar para comparar el consumo y eficiencia energética de los transportes de tracción eléctrica analizados en el presente estudio, simulando un recorrido comercial en la ruta tranviaria, se ha considerado los datos obtenidos del recorrido del Kia Soul EV, los datos aproximados a partir del modelo matemático simulando la operación del BEB y los datos del propio Tranvía a partir de datos de su operación en el período de pruebas. A partir de la figura 5.19, se deduce que el EV es el que presenta un consumo energético mucho menor, una mayor eficiencia y consumo por pasajero en relación al autobús y el tranvía, pero no es un

sistema de transporte masivo por lo que no estaría en las mismas condiciones comparativas en relación al autobús y el tranvía. Sin embargo, es una buena aproximación si se desea conocer cuáles serían los consumos y eficiencia si se utilizara un EV como taxi realizando el recorrido de la ruta tranviaria.

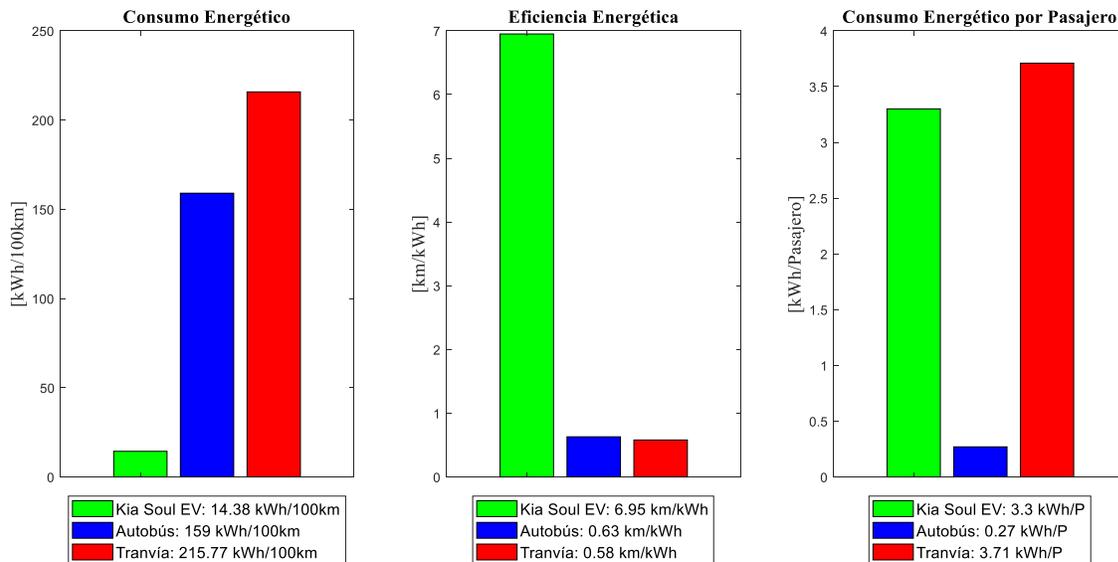


Figura 5.19. Comparación del Consumo y Eficiencia Energética de los medios de transporte eléctricos en la Ruta Tranviaria (Automóvil, Autobús y Tranvía).
Fuente: Propia del Autor.

Por otra parte, haciendo un símil del consumo y eficiencia del BEB y del tranvía a partir de los resultados de la figura 5.19, se observa que el BEB presenta un consumo energético menor en un 36% con respecto al escenario de pruebas del tranvía en el mejor caso, una eficiencia energética mayor en un 9% y un consumo energético por pasajero menor en un 1374% en relación al tranvía, debido a que el autobús goza de una mayor acogida entre los usuarios representando el medio de transporte público con mayor demanda en la ciudad, no así el tranvía que tuvo una menor utilización por los usuarios en su período de pruebas y capacitación. De no revertirse esta situación, el tranvía representará un medio de transporte del alto consumo energético por pasajero y por ende menos eficiente que el BEB que en un futuro cercano se espera esté listo para entrar en operación comercial.

Cabe la pena indicar que los resultados presentados del BEB corresponden a valores obtenidos a partir de un modelo matemático donde sus parámetros fueron ajustados de tal manera que



coincidan con el consumo energético real obtenido de las pruebas realizadas por el BEB recorriendo tres rutas comerciales en la ciudad, y que, de alguna manera, el error que puedan presentar los resultados obtenidos no está cuantificado. Además, los datos obtenidos de la operación del tranvía son reales obtenidos de medidores especiales instalados en la cabecera de los alimentadores en las SE, pero corresponden a un período de pruebas en donde se han restringido el número de pasajeros, el número de unidades que circulan y el número de recorridos al día por lo que no son datos de una operación comercial real del tranvía, pero que por el momento son los que más se aproximan a ese escenario. Sin embargo, se puede considerar como una aproximación válida para un escenario hipotético de operación de estos sistemas de transporte eléctricos en la ruta comercial del tranvía. Los resultados presentados en la figura 5.19, pueden proporcionar una visión global de la situación en donde el tranvía bajo ciertas condiciones operativas de demanda por los usuarios, puede no ser un medio de transporte público eficiente energéticamente en relación a otro sistema de transporte masivo como el BEB, y que no sea la solución esperada a los problemas de movilidad que se presentan actualmente en la ciudad dentro de un marco de movilidad sostenible que se desea implementar.



6. Implementación y simulación de la red eléctrica de alimentación del tranvía incorporando estaciones de carga

6.1. Introducción

En este capítulo se realiza la implementación y simulación de la red eléctrica de alimentación del tranvía incorporando estaciones de carga a su infraestructura mediante el software de análisis OpenDSS. Para ello se realiza una breve descripción de los elementos que constituyen la red eléctrica de alimentación del tranvía, así como sus principales características técnicas. Se plantea un diagrama unifilar general de la composición de la red eléctrica de alimentación del tranvía a nivel de MT. Se exponen las principales características y prestaciones del software de análisis OpenDSS junto con MATLAB en la implementación y simulación de la red eléctrica del tranvía mediante flujos de carga determinísticos diarios. En primera instancia, se implementa y simula la red eléctrica de alimentación del sistema tranviario en OpenDSS para los escenarios de operación inicial, horizonte y de pruebas del tranvía. Se verifica la validez de la implementación de la red eléctrica del tranvía, comparando la demanda máxima y el consumo energético obtenido con la proyectada en las características técnicas del diseño del proyecto.

También se obtienen los perfiles de voltaje en los nodos de MT y BT. Para plantear la incorporación de las estaciones de carga a la red eléctrica del tranvía, se determina la ubicación geográfica de lugares potenciales en donde se van a instalar los puntos de carga a lo largo de la ruta tranviaria. Esta selección se realiza bajo el criterio de su cercanía con las SE de tracción y por la disponibilidad del espacio físico para acoger a las unidades (EV y BEB) que van a recargar sus baterías. Se establece las características técnicas de los elementos eléctricos necesarios para la instalación de las estaciones de carga que se van a



incorporar a la red eléctrica del tranvía, como las acometidas en MT y BT, centro de transformación y electrolinerías. Se modelan los perfiles de demanda diarios para el EV, BEB y tranvía para simular la operación comercial del tranvía y operación de las electrolinerías que se abastecen del sistema eléctrico del tranvía en la red integral de transporte público a implementar en el software de análisis. Los perfiles de demanda se han obtenido del sistema Scada del Laboratorio de Microrred de la Universidad de Cuenca a partir de la carga real de EV y BEB realizadas en sus instalaciones. El perfil de demanda del tranvía se ha obtenido de datos reales de su operación en el período de pruebas, obtenidos de los medidores especiales en la cabecera de los alimentadores, y que fue presentado en la figura 5.16.

Se implementa la incorporación de las estaciones de carga en el OpenDSS para realizar la simulación de la red eléctrica integral de alimentación del tranvía en diez escenarios operativos. Estos escenarios consideran al carga rápida de una flota de EV y BEB, y lenta de BEB de acuerdo a la disponibilidad de espacio físico del lugar escogido para colocar la estación de carga y de la potencia máxima que pueden entregar las electrolinerías. Como resultados de las simulaciones se obtienen perfiles de demanda y demanda máxima en la cabecera de los alimentadores, perfiles de voltaje en los nodos de MT de las SE de tracción, perfiles de voltaje en BT a la salida de los transformadores de tracción, consumo energético diario, Pérdidas de potencia en el circuito, y factor de potencia.

6.2. Elementos que constituyen la red eléctrica de alimentación del tranvía

De acuerdo a la descripción del capítulo 4, la red eléctrica de alimentación del tranvía tiene el esquema general que se muestra en el diagrama de la figura 4.4, en donde, las SEF del tranvía (SE-01 y SE-05) se abastecen de las SE de potencia 04 (Parque Industrial) y 05 (El Arenal) de propiedad de la EERCS, para alimentar en cascada a las SEI (SE-02, SE-03 y SE-04) y a la SE-T/C. En condiciones normales de operación, la SE 05 alimentará a las SE-01, SE-T/C y SE-02, mientras que la SE 04 a las SE-03, SE-04 y SE-05 y únicamente en



condiciones emergentes las SE-02 y SE-03 se interconectarán a través de una acometida cuando una de las SE de potencia deba abastecer a toda la red de alimentación del tranvía. El diagrama unifilar de la red eléctrica de alimentación del sistema tranviario se observa en la figura 6.1, de la cual se identifican las SE de Potencia, SE Eléctricas del Tranvía, Acometidas en MT y Líneas en LV.

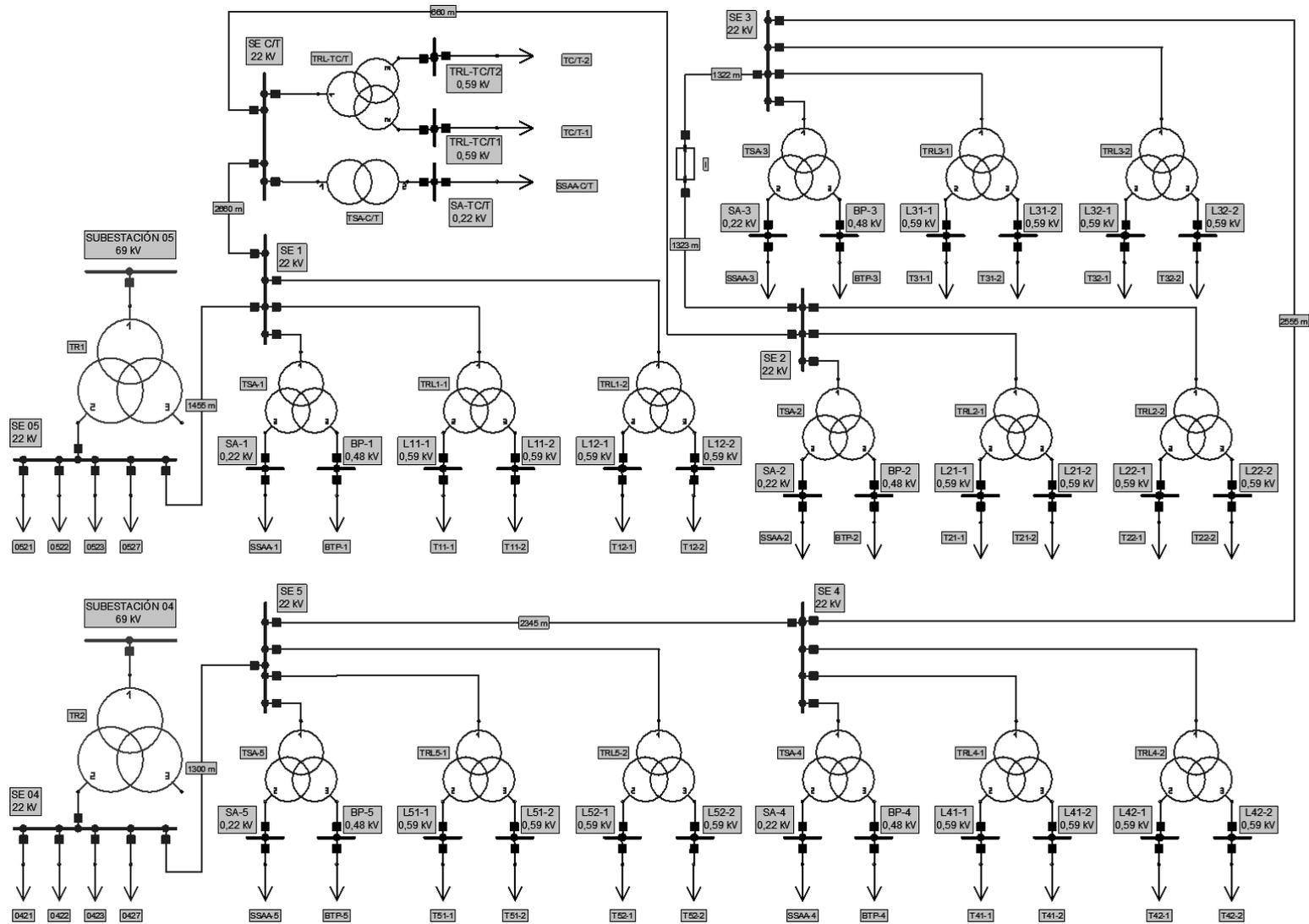


Figura 6.1. Diagrama Unifilar de la Red Eléctrica de Alimentación del Tranvía.
Fuente: Propia del Autor.



6.2.1. SE de potencia:

Conformada por las SE 04 y 05 de la EERCS que alimentan a todas las SE propias del tranvía. La SE 04 a través del transformador de potencia denominado TR2 en la figura 6.2 abastece la demanda de los alimentadores 0421, 0422, 0423, 0427 y 0428 que es el alimentador exclusivo del tranvía, mientras que la SE 05 abastece mediante el transformador denominado TR1 a los alimentadores 0521, 0522, 0523, 0527 y 0528 que es el que alimenta de forma exclusiva también a la red del tranvía. Los parámetros técnicos de cada transformador de potencia se describen en la tabla 6.1.

Tabla 6.1. Parámetros de los Transformadores de Potencia en las SE 04 y 05.
Fuente: Propia del Autor.

PÁRAMETROS		SE 04 Parque Industrial	SE 05 El Arenal
Denominación Transformador		TR2	TR1
Marca		SHENDA	ABB
Tipo		Reducción	Reducción
Nro. Devanados		3	3
Capacidad Nominal [MVA]		24	24
Frecuencia [Hz]		60	60
Tensión [Kv]	Primario	69	69
	Secundario	22	22
	Terciario	6.3	10
Tipo de Conexión	Primario	YNo	YNo
	Secundario	Yno	Yno
	Terciario	Delta 5	Delta 5
Pérdidas [kW]	Vacío	23.376	17
	Plena Carga	78.425	93
Impedancia de CC [%]	Zcc12	9.458462	9.008885
	Zcc23	3.334426	3.206634
	Zcc31	13.91761	13.38831

6.2.2. SE eléctricas del tranvía:

La red eléctrica del tranvía tal como se describe en la sección 4.2.4 consta de 6 SE soterradas con la disposición de sus equipos de acuerdo a la figura 6.2, de las cuales dos son SEF (SE 1 y SE 5 en la figura 6.1) cuyo diagrama unifilar se destalla en las figuras 4.4 y 4.5, tres SEI (SE 2, SE 3, SE 4 en la figura 6.1) cuyo diagrama unifilar se aprecia en la figura 4.7 y una SE-C/T en la figura 6.1 con un esquema unifilar tal como se muestra en la figura 4.8.

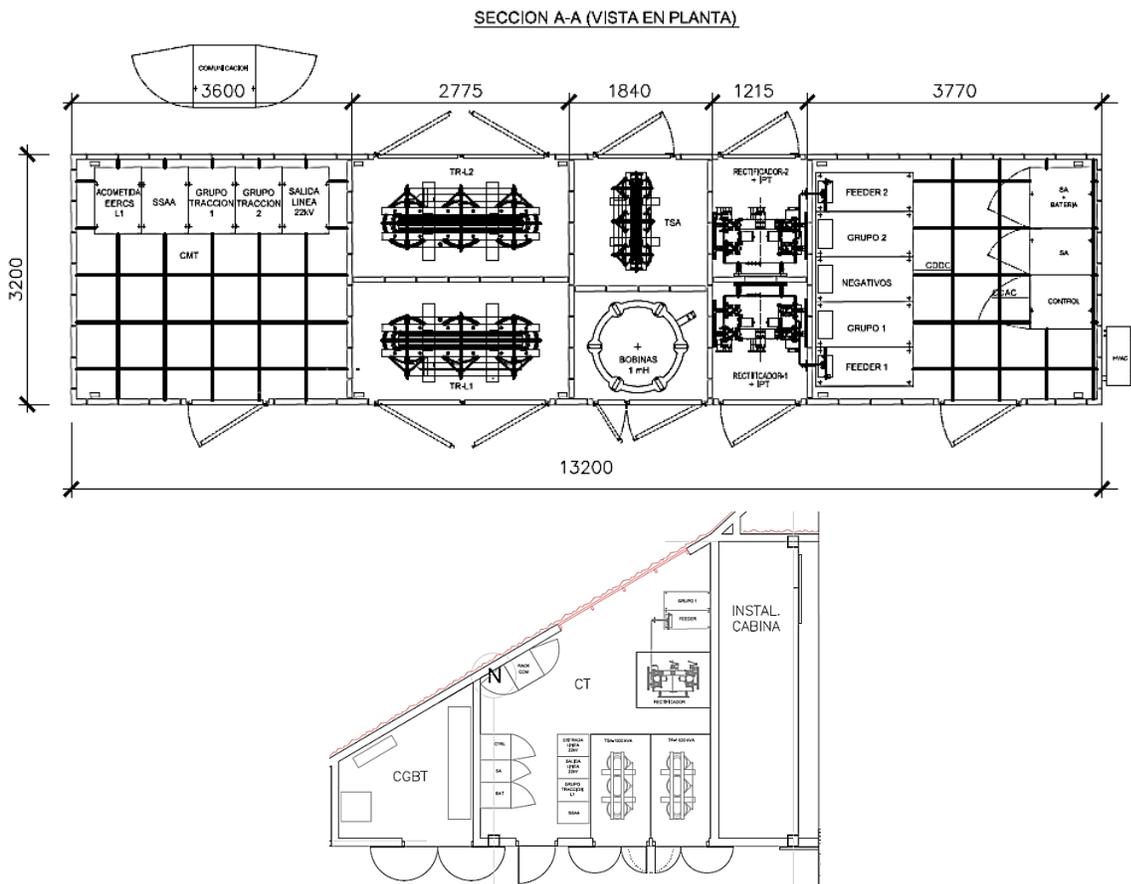


Figura 6.2. Disposición de Elementos en las SE del Tranvía.

Fuente: “Estudios complementarios y de Ingeniería Básica de la Red Primaria de Transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de Los Cuatro Ríos” Diseños Eléctricos.

En las SEF y SEI encontramos un transformador para servicios auxiliares identificados como TSA en la figura 6.1, cuyas especificaciones técnicas se describen en la tabla 4.5, y dos transformadores de tracción identificados como TRL en la figura 6.1, cuyas especificaciones se



describen en la tabla 4.3, de los cuales uno se utiliza para la tracción propiamente del material rodante y el otro de reserva por dimensionamiento de seguridad ante posibles fallos. En la SE-C/T encontramos un transformador para servicios auxiliares cuyas especificaciones se indican en la tabla 4.6, y un transformador de tracción con especificaciones indicadas en la tabla 4.4. Los secundarios de los transformadores de tracción se conectan a celdas rectificadoras de 900 kW que toman los 590 VCA y lo transforman a 750 VDC que es el nivel de tensión de operación del tranvía. Existe una interconexión entre las SEI 2 y 3 por cuestiones de confiabilidad y seguridad que opera cuando una de los alimentadores por cualquier motivo no pueda abastecer a su respectivo grupo de SE.

6.2.3. Acometidas en MT:

De acuerdo a la descripción 4.2.3, las SE de potencia abastecen a las SEF del tranvía a través de una acometida trifásica de 3F4H con conductores de fase 3 x (2 x 250 kcmil) Cu XLPE 25 kV y conductor neutro (2 x 250 kcmil) Cu XLPE 25 kV. La conexión eléctrica entre las SEI se realiza con el mismo cable. Las longitudes de estas acometidas se muestran en la figura 6.1 y se describen en la tabla 4.2.

Los transformadores de servicios auxiliares y de tracción se conectan a la barra de cada SE eléctrica del tranvía mediante una acometida trifásica de 3F3H con conductores de fase 3 x (1x250 kcmil) Cu XLPE 25 kV.

6.2.4. Líneas en LV:

Las salidas de los transformadores de servicios auxiliares se interconectan con los cuadros de servicios auxiliares en su secundario mediante un cable 3F4H con conductores de fase y neutro 4 x (1x1 AWG) Cu XLPE 600 V y en su terciario con los cuadros de alimentación de bloques técnicos de paradas mediante un cable 3F3H con conductores de fase 3 x (1x4/0 AWG) Cu XLPE 600 V. A las salidas de los transformadores de tracción de línea se conectan con las



respectivas celdas rectificadoras mediante cables trifásicos 3F3H con conductores de fase 3 x (3x750 kcmil) Cu XLPE 2 kV.

6.3. Implementación de la red eléctrica de alimentación del tranvía y simulación en la plataforma OpenDSS

6.3.1. Descripción del Software OPenDSS:

Desarrollado por EPRI (*Electric Power Research Institute*); el OpenDSS (*The Open Distribution System Simulator*) es una herramienta de código abierto y de libre acceso para la simulación en tiempo secuencial de sistemas de distribución de energía eléctrica en estado estable (dominio de la frecuencia), diseñado para soportar la integración de nuevas tecnologías y DER en las redes eléctricas, y evidenciar sus impactos llevando a cabo estudios de planificación y análisis como flujos de potencia, cortocircuitos, eficiencia energética, estudios dinámicos, probabilísticos y de calidad de la energía de las redes eléctricas [48]. Además, se ha escogido la herramienta por las prestaciones y versatilidad que presentan en estudios como [16] y [49] en donde se realizan análisis similares a los que se desea llevar a la práctica en este estudio.

OpenDSS utiliza para el modelamiento de los elementos de un sistema eléctrico un lenguaje de programación como Python, C ++, Matlab, Java, VBA, a través de secuencias de comandos o *scripts* de programación mediante una interfaz COM (*Component Object Model*) que emulan las características técnicas y operativas de los componentes de la red eléctrica de distribución y su interacción entre sí. OpenDSS presenta una amplia librería de componentes eléctricos. De esta manera se puede implementar el modelo de distintos elementos eléctricos de una red de distribución de acuerdo a la figura 6.3, como elementos de entrega de potencia (transformadores, capacitores, reactores y líneas de subtransmisión y distribución), elementos de conversión de potencia (generadores, cargas, sistemas de generación distribuida y almacenamiento), y elementos de medida (medidores de energía, monitores y sensores) que en conjunto conforman el sistema eléctrico a simular [50].

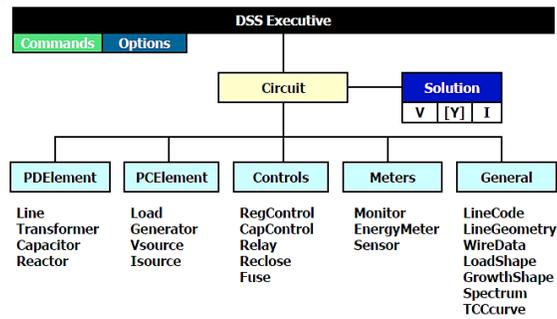


Figura 6.3. Estructura de los objetos que se pueden emular en OpenDSS.
Fuente: Fuente: *OpenDSS. Introductory Training Level 1* [50].

6.3.2. Resolución de flujos de potencia en OpenDSS:

OpenDSS presenta una funcionalidad muy completa para el cálculo de flujos de potencia en redes de distribución radiales o malladas, que incluyen análisis de flujo de carga instantáneo, diario, anual y de ciclo de trabajo [48]. En esta tesis, se considera el estudio de un flujo de carga diario de una red de distribución tipo radial. El modelo del circuito a implementar puede ser monofásico, multifásico o un modelo de secuencia positiva simplificada, mientras que las cargas y los generadores se pueden modelar como fuentes de inyección o admitancias en la matriz de admitancia del sistema [51]. El módulo de cálculo de flujos de potencia básico del OpenDSS proporciona dos tipos de soluciones, una directa y otra iterativa. El flujo de potencia directo obtiene la solución al problema sin realizar iteraciones mediante el método normal, y se aplica en redes de distribución con componentes lineales. Mientras que el flujo de potencia iterativo se utiliza cuando se presentan elementos no lineales en el circuito como cargas variables y generación distribuida. El flujo de potencia iterativo proporciona dos métodos de solución basados en los algoritmos iterativos de Gauss y Newton [52].

El algoritmo iterativo de Gauss para resolver los flujos de potencia de una red de distribución de n nodos en OpenDSS se presenta en la figura 6.4. Luego de implementar el modelo de la red de distribución que se desea simular, el software construye la matriz de admitancia primitiva Y_{prim} de cada elemento eléctrico por el que fluye corriente eléctrica en el circuito, para construir el modelo de admitancias del sistema definido por la matriz Y . El ciclo de iteraciones empieza con la definición de un vector inicial de voltajes V_0 y el cálculo de las corrientes inyectadas por todos

los elementos de conversión de potencia (*PC Element*). Los elementos de conversión se modelan inicialmente como lineales para ejecutar una solución directa de la expresión $I = Y * V$, y así encontrar el vector de corrientes I_{inj} . El vector de corrientes I_{inj} que está en función del voltaje, y la matriz Y , forman el conjunto de ecuaciones no lineales de la forma $I_{inj}(V) = Y * V$ que deben ser resueltas simultáneamente. La solución al flujo de potencia consiste en determinar de una forma iterativa la matriz de voltajes V resolviendo el conjunto de ecuaciones no lineales planteadas hasta que la diferencia en la comparación de los valores en la presente iteración en relación con la anterior converjan a un valor de 0.0001 pu establecido como criterio de convergencia [48]. Para resolver de forma iterativa la matriz esparsa que contiene el conjunto de ecuaciones no lineales formulado en cada iteración, el OpenDSS lo hace a través del solver para sistemas eléctricos “*KLUSolve*” [48] que consiste en un set de rutinas para resolver matrices de este tipo.

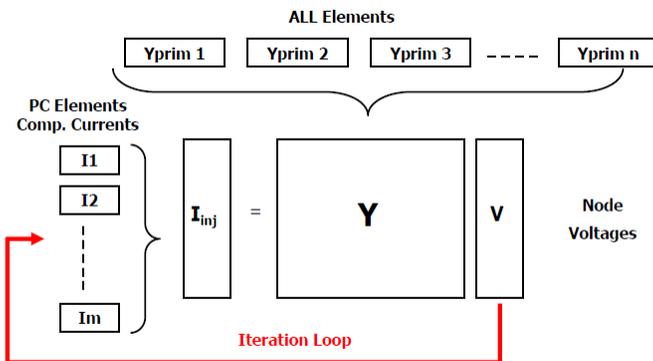


Figura 6.4. Algoritmo Iterativo de Gauss para la Solución de Flujos de Potencia del OpenDSS.
Fuente: Fuente: OpenDSS. Introductory Training Level 1 [50].

Además, el circuito se puede resolver aplicando un flujo de potencia determinístico (DLF), asignando valores aleatorios a las cargas del sistema en el modo Monte Carlo [51] cuando hay incertidumbres involucradas y algunas variables presentan comportamientos aleatorios. El DLF se utiliza para facilitar el ejercicio de planificación, evaluación y operación del sistema eléctrico en un análisis energético diario [53], cuando los flujos de carga determinísticos no son adecuados debido a la inclusión de unidades de generación distribuida intermitente y la constante variación de la carga en la red. OpenDSS posee capacidades integradas que permiten al usuario realizar ciertos estudios de Monte Carlo. Sin embargo, estas capacidades son bastante limitadas y no se

pueden usar en escenarios más complejos. Para evitar este inconveniente, OpenDSS se puede usar junto con MATLAB para realizar estudios de Monte Carlo, en los que MATLAB maneja la generación de números aleatorios, el control de ejecución y la recopilación de datos, mientras que OpenDSS es responsable de la solución del sistema eléctrico [51]. El intercambio de información entre OpenDSS y MATLAB se realiza a través de la interfaz COM. De la solución de los flujos de potencia del circuito, el programa presenta como resultado valores de pérdidas de potencia, consumo de energía, niveles de voltajes y flujos de potencia por cada rama del sistema simulando [48]. En este estudio, se plantea la simulación de la red eléctrica del tranvía aprovechando las bondades del OpenDSS en conjunto con MATLAB, mediante la ejecución de flujos de carga determinísticos, dadas las características variables de la carga en el día. Esta variabilidad de la carga se debe a la operación propia del tranvía y la incorporación de las estaciones de carga a su infraestructura de alimentación.

6.3.3. Descripción general de la implementación en OpenDSS:

Para modelar la red de alimentación del tranvía en OpenDSS se ha considerado los siguientes *scripts* de programación de acuerdo a las recomendaciones de [48], estructurados en diferentes librerías que contienen las características eléctricas de cada uno de los elementos a considerar dentro del esquema del circuito eléctrico. De manera general, nuestro programa contendrá la estructura de definiciones y librerías de acuerdo a la figura 6.5, en donde mediante una interfaz con Matlab se ejecuta el archivo “*Master.DSS*” el mismo que contiene información general del circuito como su voltaje, frecuencia y número de fases, y redirecciona a las diferentes librerías para tomar los datos necesarios para armar el circuito deseado y ejecutar las acciones requeridas.

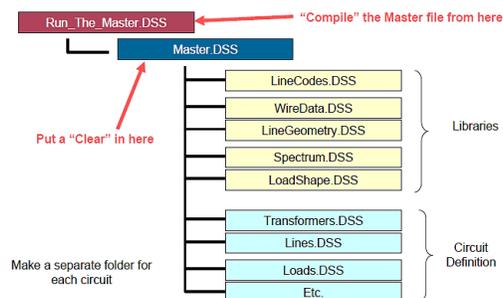


Figura 6.5. Estructura de los Objetos que se pueden emular en OpenDSS.
Fuente: OpenDSS. Introductory Training Level 1 [50].



En las librerías utilizadas en la implementación se dispone de la siguiente información:

- a) **LineCodes.DSS:** Los valores de la matriz de impedancia característica de cables y conductores utilizados en las diferentes acometidas en MV y líneas en LV.
- b) **WireData.DSS:** Librería que contiene las características eléctricas y constructivas de los diferentes cables y conductores utilizados para las acometidas y líneas de LV con la finalidad de calcular la impedancia en base a la geometría o disposición de las líneas.
- c) **LineGeometry.DSS:** Define a los conductores y la posición espacial de estos utilizados para las acometidas y líneas del circuito que en este caso son de tipo XLPE subterráneas.
- d) **LoadShape.DSS:** Librería que contiene el perfil de demanda diario de las cargas variables en el tiempo del circuito. En esta librería se incluirán los datos en kW de los perfiles de demanda de la tracción del material rodante en los escenarios inicial, horizonte y de pruebas, de los bloques técnicos en paradas y de la demanda de las electrolineras para la carga de EV y BEB.

Como definiciones propias del circuito se tiene:

- e) **Transformers.DSS:** Librería que contiene las características eléctricas de los transformadores del circuito y especifica además como están interconectados con los demás elementos del circuito a través de los distintos nodos de conexión.
- f) **Lines.DSS:** Librería que contiene a las líneas de MT y BT utilizados en el circuito, la conexión con los distintos nodos del circuito, su disposición espacial y su longitud.
- g) **Loads.DSS:** Establece las cargas del circuito, sus características eléctricas, identificación de los nodos a los que se conecta y su tipo (fijas o variables en el tiempo).

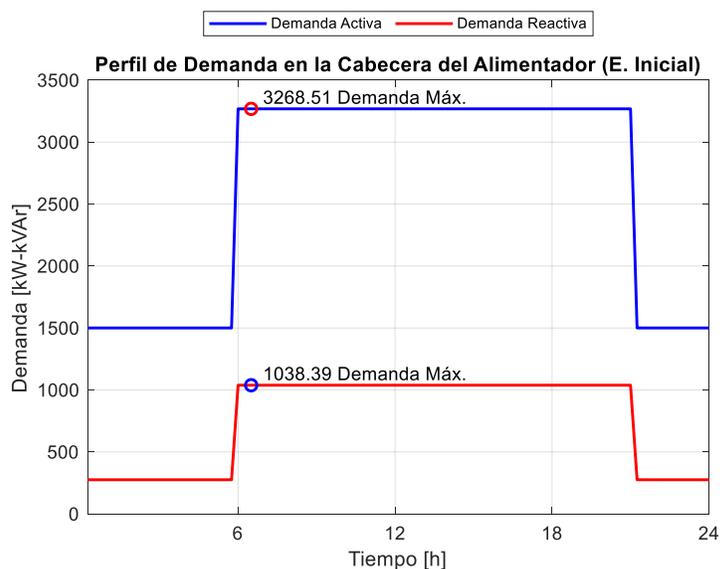
6.3.4. Simulación de la red eléctrica del tranvía en un escenario inicial y horizonte de operación:

Una vez realizada la implementación de los elementos eléctricos del circuito de alimentación del tranvía en las distintas librerías de acuerdo a la estructura de operación del OpenDSS, se procede a simular flujos de potencia del sistema eléctrico. La simulación considera un escenario inicial (operación comercial con 12 unidades y una frecuencia de explotación de 6 minutos), un



escenario horizonte (operación comercial con 16 unidades y una frecuencia de explotación de 4 minutos) de acuerdo a los estudios eléctricos realizados en [31], y que sirvieron de base para proyectar la demanda y consumo energético del proyecto tranvía en un hipotético escenario de operación comercial. En este caso, se ha considerado para la simulación la condición menos favorable de operación del sistema, es decir, que uno de los dos alimentadores abastezca el consumo energético total. Como resultado de las simulaciones, se monitoreará la demanda diaria en la cabecera del alimentador en operación, el consumo energético diario y los voltajes en las barras de las SE del tranvía en el lado de MT y BT, con el fin de validar los resultados obtenidos con los presentados en los estudios eléctricos.

De las simulaciones realizadas se determina que con la alimentación del sistema integral ya sea desde el alimentador 0428 en la SE 04 o desde el alimentador 0528 desde la SE 05 se obtienen resultados muy similares, por lo que se mostrará únicamente los resultados considerando el abastecimiento para los escenarios inicial y horizonte desde el alimentador 0428. Así, el perfil de demanda diaria en la cabecera del alimentador del sistema tranviario para ambos escenarios se observa en la figura 6.6, de donde se corrobora que la demanda de potencia activa inicial está por el orden de 3.27 MW y la de horizonte 3.74 MW tal como se plantea en los diseños eléctricos de [31]. El incremento de la demanda se presenta en el rango horario de operación del tranvía que se ha establecido desde las 06h00 hasta las 22h00 de forma ininterrumpida.



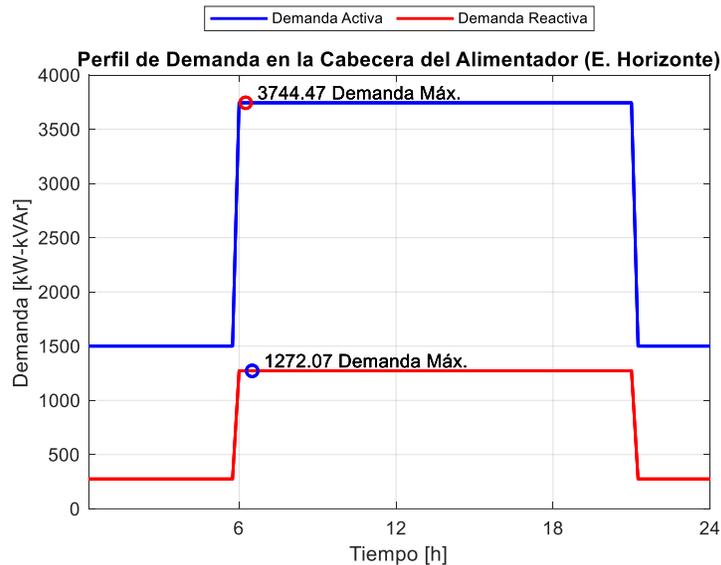


Figura 6.6. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para los Escenarios Inicial y Horizonte.
Fuente: Propia del Autor.

Sin embargo, el consumo energético de acuerdo a los resultados de la tabla 4.2 y que corresponden a los diseños eléctricos presentados en [31] (36.04 MWh para el escenario inicial y 44.40 MWh para el horizonte) difieren de los obtenidos en la simulación, que están en el orden de 150 MWh para el inicial y 167 MWh para el de diseño.

Los perfiles de voltaje a nivel de las barras de MV para ambos escenarios se observan en la figura 6.7, de donde se evidencia que la mayor caída de tensión se presenta en el escenario horizonte en la barra de la subestación 1 que es la más alejada del circuito con respecto a la fuente (alimentador) con un nivel de 21.50 kV o 0.977 pu, mientras que los perfiles de voltaje a nivel de las barras de LV se evidencian en la figura 6.8, de donde se observa que la mayor caída de tensión se presenta en el escenario de horizonte, específicamente en la SE-C/T alcanzando un nivel de 535.9 V o 0.9083 pu, en el devanado secundario y terciario del transformador de tracción. Para ambos escenarios, los perfiles de voltaje tienen características similares.

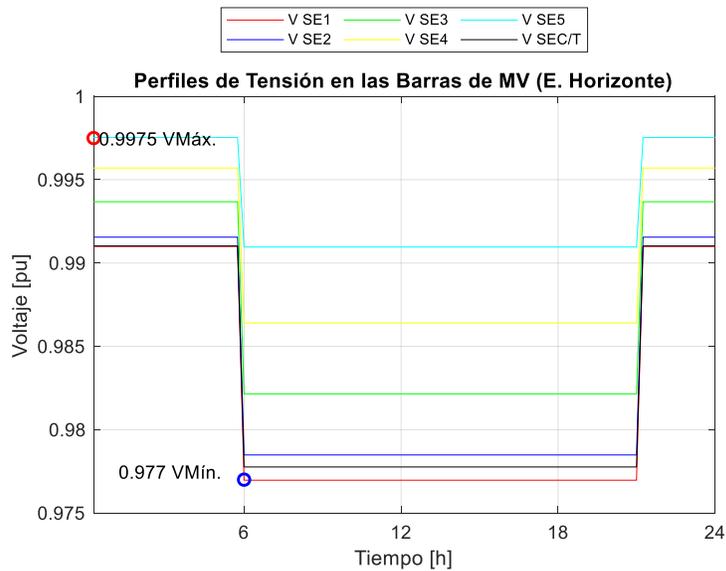
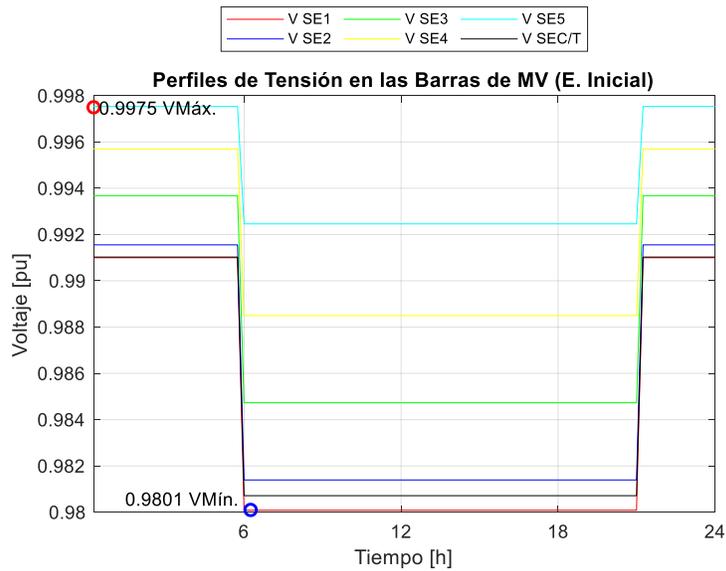


Figura 6.7. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para los Escenarios Inicial y Horizonte.
Fuente: Propia del Autor.

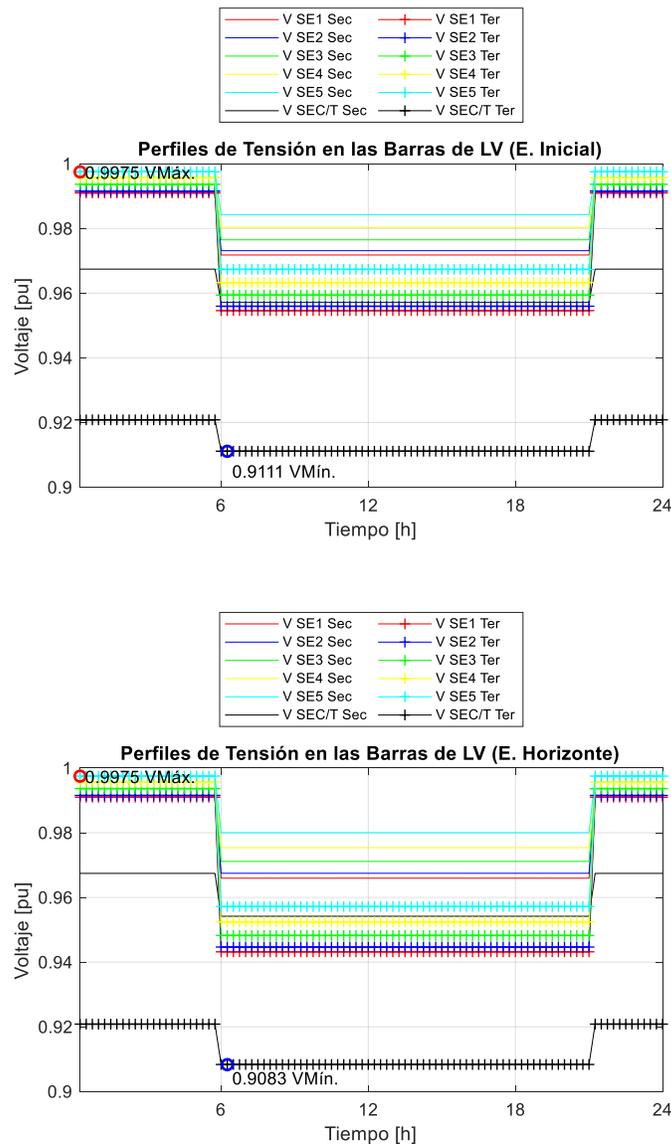


Figura 6.8. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para los Escenarios Inicial y Horizonte.
Fuente: Propia del Autor.

6.3.5. Simulación de la red eléctrica del tranvía en el escenario de pruebas:

Para simular la red eléctrica del tranvía en el escenario de pruebas descrito en el capítulo 5, se considera el perfil de demanda diario típico de pruebas de la figura 5.16 como referencial para este análisis. Este perfil se incluye en todas las barras de MT de las SE del tranvía simulando la operación comercial del tranvía en un escenario horizonte. Además se considera que el

alimentador 0428 abastece toda la demanda energética del sistema. La cantidad de potencia en el día requerida se observa en la figura 6.9, de donde se tiene que, la demanda máxima de potencia activa es de 3.43 MW y la de reactiva es de 385.48 kVAr capacitivos, debido fundamentalmente a las acometidas subterráneas que se comportan como cargas capacitivas generando potencia reactiva que es absorbida por la red de distribución. El pico de demanda en ambos casos se produce en el período de demanda máxima cerca de las 18h00.

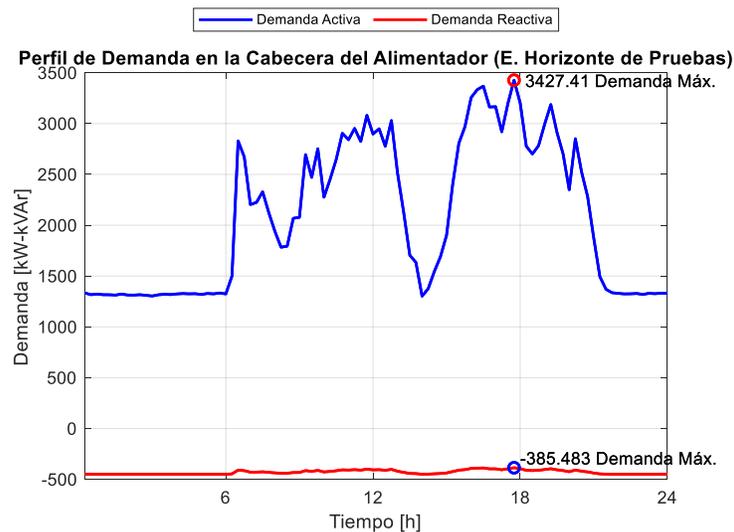


Figura 6.9. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para el Escenario de Pruebas.
Fuente: Propia del Autor.

El consumo energético para este escenario de pruebas está en el orden de los 118 MWh.

Los perfiles de voltaje en las barras de MV y LV para el periodo de pruebas se observan en las figuras 6.10 y 6.11 respectivamente, de donde se puede apreciar que presentan variaciones similares a lo largo del período de análisis de acuerdo al incremento o disminución de la demanda en el sistema eléctrico. Se observa que, los niveles de voltaje permanecen sin mayores variaciones en el período no operativo del tranvía, es decir de 23h00 a 06h00 del día siguiente. Sin embargo, estos niveles disminuyen cuando se incrementa la carga en el sistema eléctrico debido a la operación del tranvía en el período de 06h00 a 22h00, y aumentan cuando se reduce la demanda tal como se puede observar en el período comprendido entre las 13h00 y 14h00 en donde las unidades del tranvía no se encontraban circulando.

El máximo nivel de voltaje alcanzado está en la barra de MV de la SE 5 con 22.03 kV o 1 pu en el período de menor consumo, mientras que el menor nivel de voltaje está en la barra de la SE 1 con 21.84 kV o 0.9931 pu en el período de mayor demanda respectivamente. Con respecto al perfil de voltajes en las barras de LV, se evidencia que el mayor nivel se alcanza en el terciario del transformador de tracción de la SE 5 con 590.79 V o 1 pu, mientras que el menor nivel de voltaje se presenta en el secundario del transformador de tracción de la SE 1 con un nivel de 586 V o 0.9931 pu, como se observa en la figura 6.10.

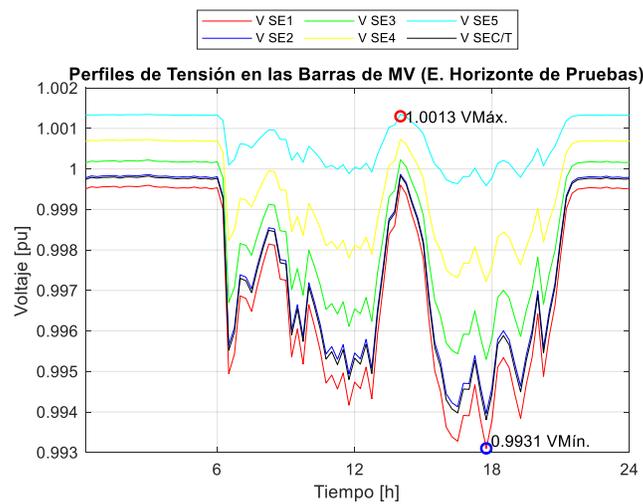


Figura 6.10. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para el Escenario de Pruebas.
Fuente: Propia del Autor.

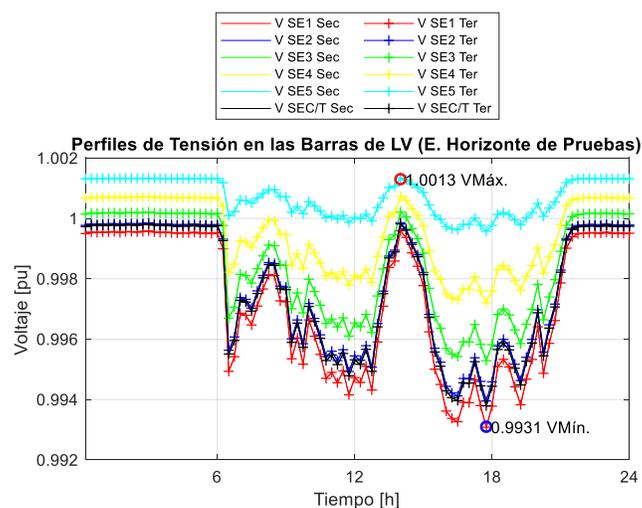


Figura 6.11. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para el Escenario de Pruebas.
Fuente: Propia del Autor.



6.4. Determinación de la ubicación geográfica de las estaciones de carga a incorporar en la red eléctrica del tranvía

Como parte de esta investigación se desea determinar lugares potenciales que se denominarán “Puntos de Carga” que, por su ubicación geográfica y disponibilidad de espacio físico, prestan las facilidades para instalar electrolinerías y acoger a una flota de BEB y EV que requieran recargar sus baterías a cualquier hora del día. Estos lugares que, además de brindar las facilidades y comodidades de parqueo, se han escogido de acuerdo a la proximidad entre los puntos de carga y las SE del tranvía. Así dichos puntos se ubican geográficamente en las inmediaciones de las SE eléctricas del tranvía de donde se tomará la carga para alimentar a las electrolinerías consideradas.

El criterio para esta selección se debe a que en cada SE subterránea, se pretende colocar un transformador conectado a la barra de MT (22 kV) tal como lo recomienda el estudio [21], para abastecer la demanda de las electrolinerías. La elección del transformador queda restringido a la disponibilidad del espacio físico en la SE para incorporar toda la aparamenta que una estación de transformación requiere. No se ha considerado utilizar los transformadores de tracción disponibles en cada SE debido a que se requeriría colocar un transformador reductor adicional para obtener el nivel de voltaje que demandan las electrolinerías para su correcta operación (440 VCA), ya que estos transformadores operan a 590 VCA, además de que se trata de un transformador de respaldo para contingencias que siempre debe estar disponible para alimentar la tracción de material rodante exclusivamente.

Los puntos de carga seleccionados se ubican geográficamente tal como lo indica la figura 6.12, de donde se observa que se podrían colocar estaciones de carga en las instalaciones del Coral Centro (figura 6.13) y la estación de servicio P&S (figura 6.14) de la Av. de las Américas, Expo Azuay (figura 6.15) en la Av. México, gasolinera Clyan (figura 6.16) en la Av. España y Estaciones de Transferencia del Arenal (figura 6.17) y Terminal Terrestre (figura 6.18) en la Av. de las Américas y España respectivamente. Las SE que tomarán la carga de estos puntos planteados con sus respectivas distancias hacia los puntos de carga se identifican en la tabla 6.2,

de donde se plantea que cada SE alimente a un grupo de estaciones de carga rápida y lenta a través de los transformadores conectados a la red de MT de la SE.

Tabla 6.2. Ubicación de los puntos de carga considerados.
Fuente: Propia del Autor.

SE	PUNTO DE CARGA	DISTANCIA A SE [m]	TIPO DE VEHÍCULO	TIPO DE CARGA
SE 1	Coral Centro	440	EV	Rápida [400 kW]
	Estación de Servicio P&S El Arenal	845		
SE 2	Estación de Transferencia El Arenal	190	EV	Rápida [400 kW]
			BEB	Lenta [40 kW] – Rápida [80 kW]
SE 4	Gasolinera Clyan	80	EV	Rápida [400 kW]
	Estación de Transferencia Terminal Terrestre	415	BEB	Lenta [40 kW] – Rápida [80 kW]
SE-C/T	Instalaciones de Expo Azuay	243	EV	Rápida [400 kW]
			BEB	Lenta [40 kW] – Rápida [80 kW]

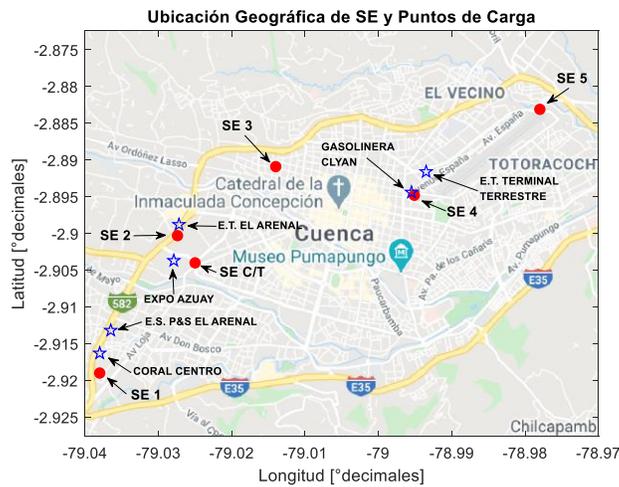


Figura 6.12. Ubicación Geográfica de SE del Tranvía y “Puntos de Carga”.
Fuente: Propia del Autor.

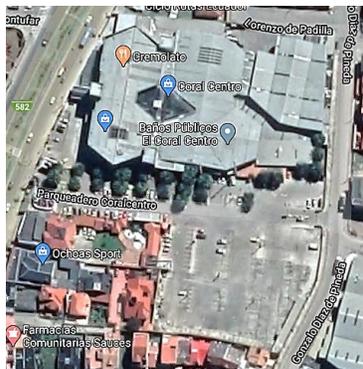


Figura 6.13. Vista de las instalaciones del Coral Centro en la Av. de las Américas.
Fuente: Propia del Autor.

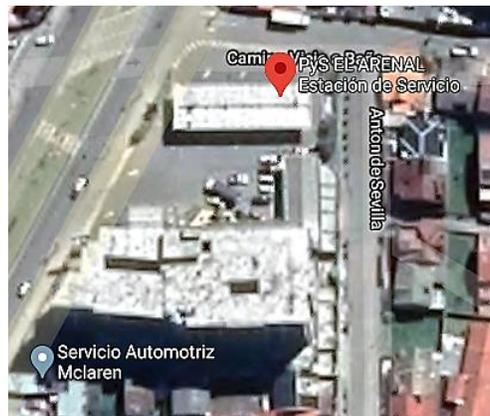


Figura 6.14. Vista de las instalaciones de la Estación de Servicio P&S el Arenal en la Av. de las Américas.
Fuente: Propia del Autor.



Figura 6.15. Vista de las instalaciones de Expo Azuay en la Av. México.
Fuente: Propia del Autor.

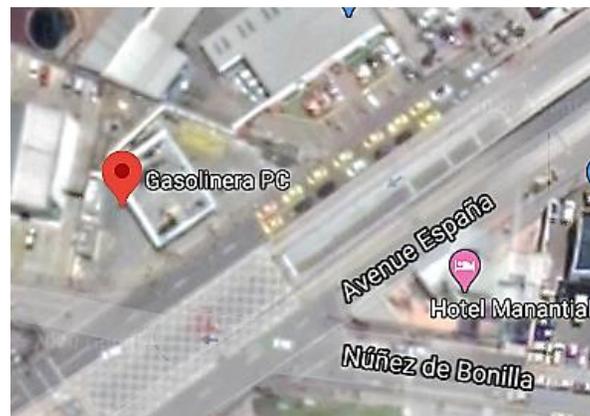


Figura 6.16. Vista de las instalaciones de la Estación de Servicio Clyan (Gasolinera PC) en la Av. España.
Fuente: Propia del Autor.



Figura 6.17. Vista de las instalaciones de la Estación de Transferencia El Arenal en la Av. de las Américas.
Fuente: Propia del Autor.



Figura 6.18. Vista de las instalaciones de la Estación de Transferencia Terminal Terrestre en la Av. España.
Fuente: Propia del Autor.

6.5. Características técnicas de los puntos de carga

Los puntos de carga que se pretenden incluir en las inmediaciones de las SE de tracción del sistema tranviario deben estar en la capacidad de suplir la demanda de la recarga de EV y BEB del sistema integral de transporte público en la ciudad. Para ello se ha considerado dos tipos de carga. Una carga lenta con una potencia de 40 kW para los BEB en rangos horarios en los que el tranvía no se encuentre en operación comercial. Una carga rápida a 400 kW para los EV y a 80 kW para los BEB que requieran recargas parciales durante el día en horarios de operación comercial del tranvía, ya que se desea que estas unidades se incorporaren lo más pronto posible a



su operación comercial luego del período de recarga. Para este fin y de acuerdo con el diseño planteado en [54], se han considerado colocar en cada SE los siguientes elementos:

6.5.1. Acometida en MT:

La acometida de tipo subterránea necesaria para alimentar a los transformadores desde la barra de MT de cada SE tendrá aproximadamente una longitud de 5 m con un cable trifásico 3F3H con conductores de fase 3 x (1 x 500 kcmil) Cu XLPE 25 kV.

6.5.2. Centro de transformación:

De acuerdo al espacio físico disponible en las SE del tranvía, se plantea la incorporación de centros de transformación conformados por transformadores trifásicos de 500 kVA a un nivel de tensión de 22 kV/440 VCA, de acuerdo a los niveles que se manejan en la barra de MT de la SE y el voltaje que manejan las electrolineras para su operación. En la SE 1 se considera un centro de transformación de dos transformadores para abastecer a las electrolineras para EV del Coral Centro y Estación de Servicio el Arenal. En la SE 2 se van a considerar dos transformadores, una para la recarga de EV y otro para la recarga de BEB en la estación de transferencia el Arenal. En la SE 4 se van a considerar también estaciones de transformación de dos transformadores, uno para alimentar a la electrolinera para EV de la estación de servicio Clyan y otro exclusivamente para las electrolineras de los BEB en la estación de transferencia del terminal terrestre. En la SE-C/T se considerarán dos transformadores para las electrolineras de los EV y BEB en las instalaciones de Expo Azuay.

6.5.3. Acometida en BT:

Corresponde a la línea que interconecta al secundario del transformador con la electrolinera. Está conformado por un cable trifásico 3F4H con conductores de fase y neutro 4 x (1 x 2/0 AWG) Cu XLPE 600 V. La longitud de la acometida corresponderá a la distancia que exista entre la barra de LV y la estación de carga, de acuerdo a las distancias estimadas en la tabla 6.2.



6.5.4. Electrolineras:

Se manejarán dos tipos de estaciones de carga, una para carga lenta de BEB ubicadas en las estaciones de transferencia y otra para la carga rápida de EV y BEB en las estaciones de servicio y de transferencia respectivamente. Para la carga lenta de BEB se considerarán 6 electrolineras equipadas con dos pistolas de recarga, cada una capaz de cargar a 40 kW, dando un total de 12 puntos de carga, demandando de la red una potencia máxima de 480 kW. El proceso de carga dependiendo considerando que la batería de los BEB considerados en este análisis es de 310 kWh es de aproximadamente 8 horas. Para la carga rápida de BEB, el proceso se llevará a cabo con las mismas 6 electrolineras utilizando las dos pistolas de recarga, para obtener 6 puntos de carga a una potencia de 80 kW en un tiempo de 4 horas aproximadamente. Para la carga rápida de EV, se ha considerado que el proceso se lleve a cabo mediante estaciones de carga que entreguen una potencia de 400 kW, tomando el proceso entre 14 y 24 minutos, considerando baterías con una capacidad de 90 kWh y 180 kWh respectivamente que corresponden a las de los vehículos considerados para prestar el servicio de taxi en esta investigación.

6.6. Modelado de perfiles de demanda

Para realizar la simulación diaria en el software OpenDSS de la operación del sistema eléctrico integral del tranvía con la inclusión de las estaciones de carga a la red de alimentación, se consideran perfiles de demanda reales registrados por el sistema SCADA del laboratorio de Microrred de la Universidad de Cuenca cuando se han realizado recargas de EV y BEB en dichas instalaciones. Tomando en cuenta las consideraciones de potencia y rangos horarios especificados en la sección anterior, se han considerado perfiles de demanda acorde a las exigencias de este tipo de instalaciones.

6.6.1. Perfil de carga del EV (taxi):

Para los EV que operan como unidades de taxi, se plantea un tipo de carga rápida a 400 kW por un tiempo aproximado de entre 14 y 24 minutos para la carga completa de las baterías. Este tipo

de carga se puede llevar a cabo además en cualquier instante de tiempo, es por esto que se considerará para la simulación el perfil de carga de la figura 6.19, en donde se tiene que la carga se realiza en cada hora de los rangos horarios de los periodos de demanda base (22h00 a 7h00), media (7h00 a 18h00) y punta (18h00 a 22h00) a partir de las 5h00.

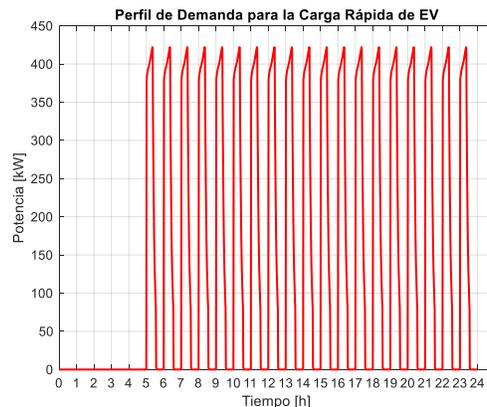


Figura 6.19. Perfil de Demanda para la simulación de Carga Rápida de EV.
Fuente: Propia del Autor.

6.6.2. Perfil de Carga del BEB urbano:

Para los BEB, este proceso se pretende llevar a cabo para cada unidad a 40 kW para la carga lenta en un período de aproximadamente 8 horas en los rangos horarios en los cuales el tranvía no se encuentre en operación comercial de acuerdo al perfil de la figura 6.20. Se considerará una potencia de 80 kW para la carga rápida de las unidades que necesiten recargas parciales en un período de 4 horas aproximadamente en los rangos horarios de operación comercial del tranvía de acuerdo a la figura 6.21.

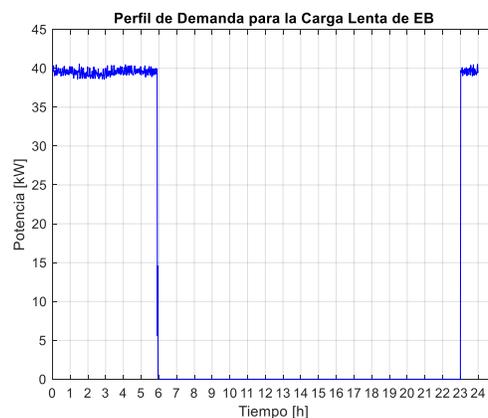


Figura 6.20. Perfil de Demanda para la simulación de Carga Lenta de BEB.
Fuente: Propia del Autor.

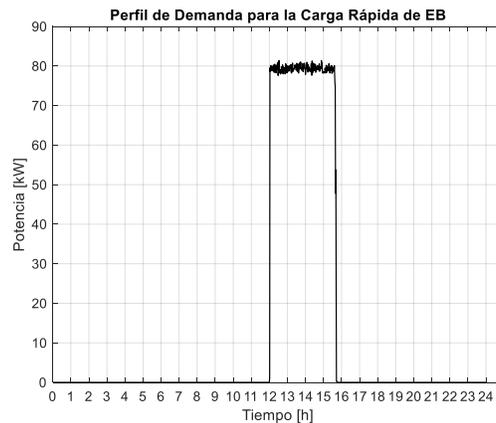


Figura 6.21. Perfil de Demanda para la simulación de Carga Rápida de BEB.
Fuente: Propia del Autor.

6.7. Simulación de la red eléctrica integral de transporte público en OpenDSS

El objetivo de esta sección es simular la red eléctrica de alimentación del tranvía para distintos escenarios operativos, y observar el comportamiento de la red ante las modificaciones planteadas, en relación a su perfil de demanda, perfiles de voltajes en los nodos de MT y BT, consumo energético diario, pérdidas de potencia y factor de potencia en el circuito. Con los perfiles de demanda y de voltaje de cada simulación, se establece si el sistema eléctrico se encuentra operando dentro de sus condiciones normales. En cada escenario se incluye el perfil de demanda del tranvía y los perfiles de demanda para la recarga de EV y BEB. El perfil de demanda del tranvía corresponde al de referencia de su período de pruebas (figura 5.16) duplicando su demanda en cada punto de tal manera que simule los requerimientos y exigencias de una operación comercial real con 14 unidades, ya que en el período de pruebas de referencia, la demanda corresponde a un día de operación con 7 unidades. El perfil de demanda para la recarga de EV y BEB corresponde a los descritos en la sección anterior (figuras 6.19, 6.20 y 6.21). Además, para las simulaciones se considera el peor escenario de operación, es decir, se establece que el abastecimiento energético se realiza únicamente a través del alimentador 0428 de la SE 04. Para las simulaciones se plantean 10 escenarios operativos, en donde se considera la carga de una cierta cantidad de unidades EV y BEB de acuerdo a la disponibilidad del espacio físico en cada uno de los sitios destinados para acoger a las estaciones de carga y del tipo de



estaciones de carga existentes en cada punto. Las particularidades de cada escenario operativo de simulación se describen a continuación:

6.7.1. Primer Escenario:

En este escenario se incluyen todas las estaciones de carga rápida planificadas en todos los puntos de carga considerados. Tal como lo resume la figura 6.22, se tendrá la capacidad de realizar 95 recargas rápidas de EV en total en el día desde las 05h00 hasta las 23h30, considerando las 19 recargas distribuidas en el día en las dos estaciones de servicio, instalaciones del Coral Centro, Expo Azuay y estación de transferencia el Arenal. Para los BEB se considerará la carga rápida de 18 unidades durante el día repartidas de la siguiente forma, 6 unidades en las instalaciones de Expo Azuay y 12 unidades en las estaciones de transferencia en el período de menor demanda del sistema, es decir de 12h00 a 16h00 aproximadamente.

Los resultados obtenidos de la simulación se observan en la figura 6.23 para el perfil de demanda del sistema a nivel de alimentador, en la figura 6.24 se observa el perfil de voltajes en las barras de MV de las SE y en la figura 6.25 el perfil de voltajes en las barras de LV de las SE de tracción del sistema tranviario. La demanda máxima de este escenario es de 7.50 MW y el consumo energético de 169 MWh. El voltaje cae hasta los 0.9674 pu en las barras de MT y a la salida del transformador de tracción en BT en el período de mayor demanda. Las pérdidas en el circuito alcanzan los 78 kW y el factor de potencia es de 0.995.

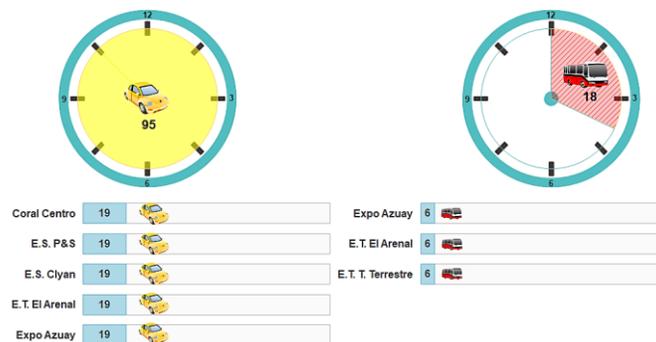


Figura 6.22. Rangos horarios y número de puntos de carga para el Escenario 1.
Fuente: Propia del Autor.

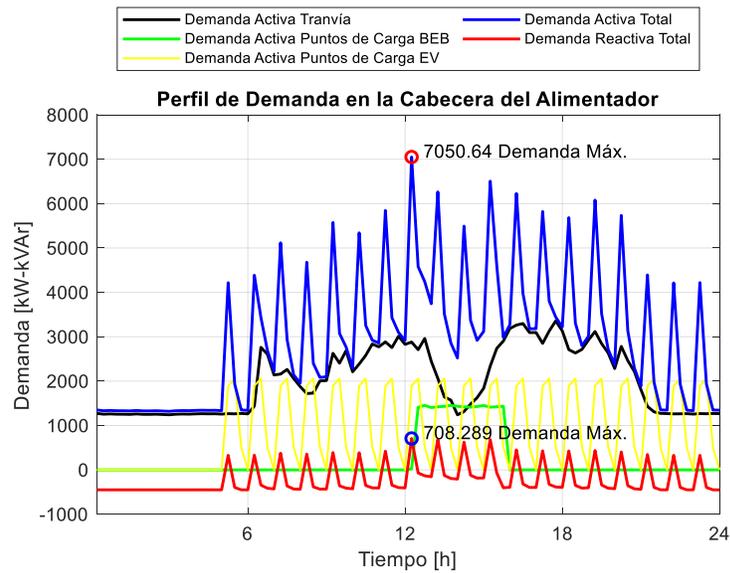


Figura 6.23. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para el Escenario 1.
Fuente: Propia del Autor.

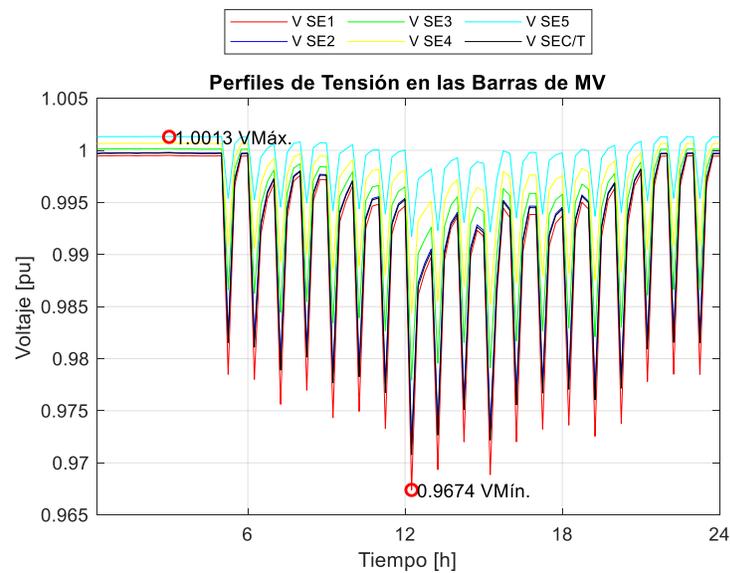


Figura 6.24. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para el Escenario 1.
Fuente: Propia del Autor.

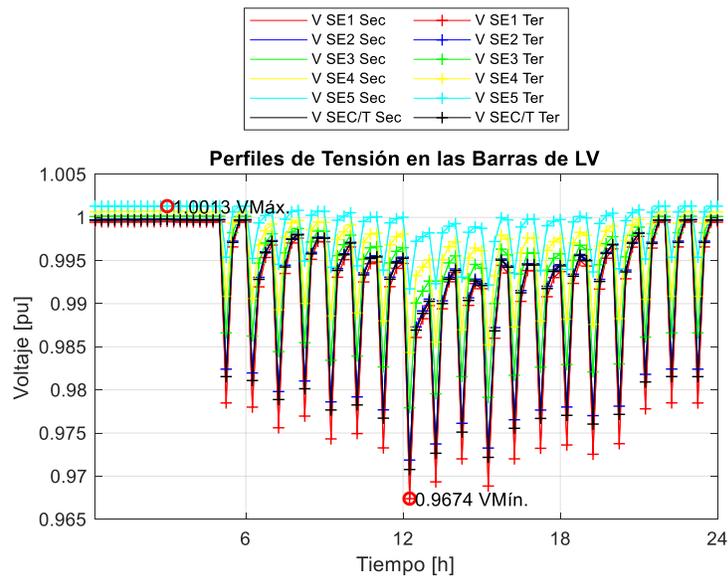


Figura 6.25. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para el Escenario 1.
Fuente: Propia del Autor.

6.7.2. Segundo Escenario:

Escenario de simulación considerando las estaciones de carga rápida para EV y lenta para BEB en los puntos de carga considerados, esto con la finalidad de incrementar al doble el número de unidades de buses que se pueden abastecer. Como se resume en la figura 6.26, en este escenario se tendrán las mismas 95 recargas rápidas de EV en el día del primer escenario (de 05h00 a 23h30), mientras que para los BEB se considerará la carga lenta de 36 unidades durante el día repartidas entre las instalaciones de Expo Azuay y estaciones de transferencia en el período de 23h00 a 06h00 del día siguiente.

Los resultados obtenidos de la simulación se observan en la figura 6.27 para el perfil de demanda del sistema a nivel de alimentador, en la figura 6.28 se observa el perfil de voltajes en las barras de MV de las SE y figura 6.29 el perfil de voltajes en las barras de LV de las SE de tracción del sistema tranviario. La demanda máxima de este escenario es de 6.21 MW y el consumo energético de 178 MWh. El voltaje cae hasta los 0.972 pu en las barras de MT y a la salida del transformador de tracción en BT en el período de mayor demanda. Las pérdidas en el circuito alcanzan los 300 kW y el factor de potencia es de 0.995.

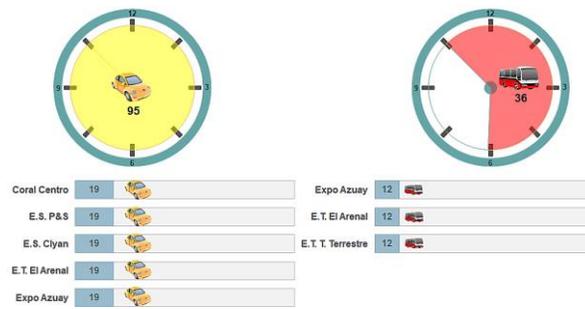


Figura 6.26. Rangos horarios y número de puntos de carga para el Escenario 2.
Fuente: Propia del Autor.

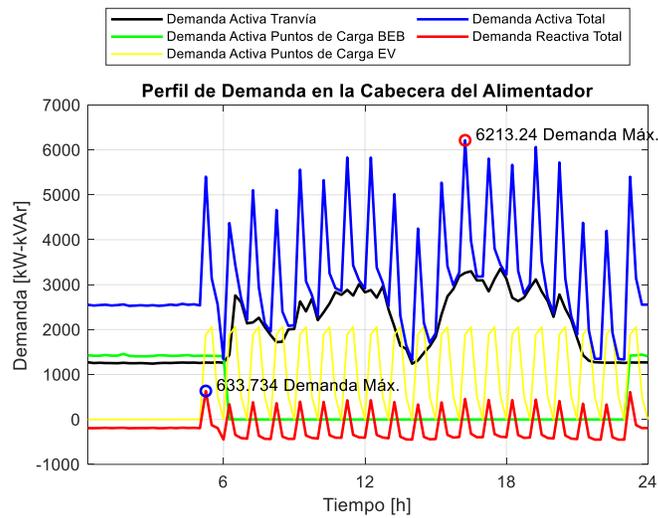


Figura 6.27. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para el Escenario 2.
Fuente: Propia del Autor.

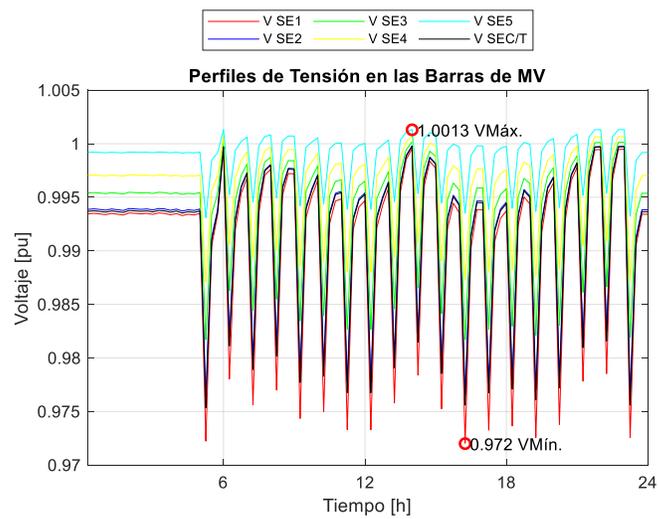


Figura 6.28. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para el Escenario 2.
Fuente: Propia del Autor.

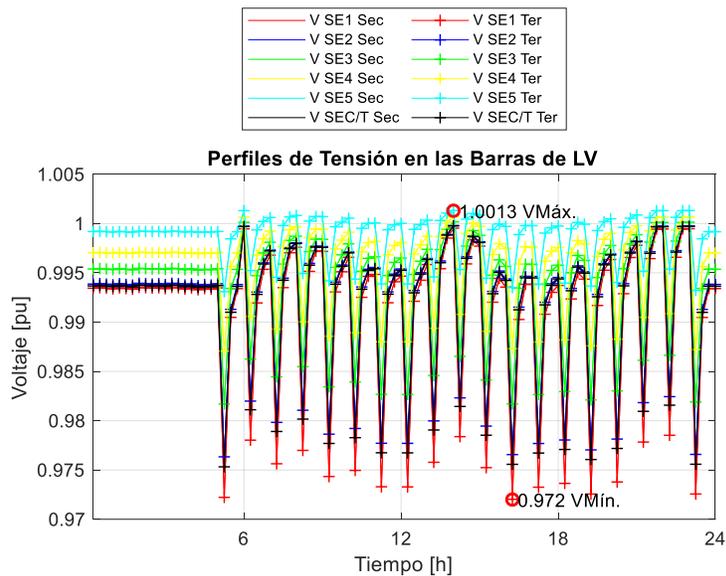


Figura 6.29. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para el Escenario 2.
Fuente: Propia del Autor.

6.7.3. Tercer Escenario:

Escenario en donde se duplican las estaciones de carga rápida y lenta para BEB únicamente. Como se indica en la figura 6.30, se tendrá la recarga de 72 unidades en carga lenta en el período de 23h00 a 06h00 del día siguiente y 36 unidades en carga rápida de 12h00 a 16h00 exclusivamente en las instalaciones de Expo Azuay y estaciones de transferencia. En este escenario tendremos cargando en un día a una flota de 108 unidades repartidas entre carga rápida y lenta.

De las simulaciones realizadas se han obtenido los resultados que se pueden apreciar en la figura 6.31 para el perfil de demanda del sistema a nivel de alimentador, figura 6.32 el perfil de voltajes en las barras de MV de las SE y figura 6.33 el perfil de voltajes en las barras de LV de las SE de tracción. La demanda máxima de este escenario es de 5.77 MW y el consumo energético de 185 MWh. El voltaje cae hasta los 0.966 pu en las barras de MT y a la salida del transformador de tracción en BT en el período de mayor demanda. Las pérdidas en el circuito alcanzan los 1,634 kW y el factor de potencia es de 0.951.

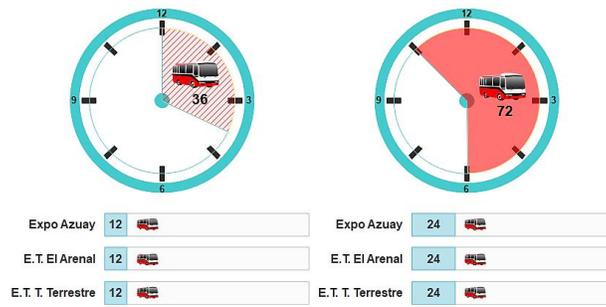


Figura 6.30. Rangos horarios y número de puntos de carga para el Escenario 3.
Fuente: Propia del Autor.

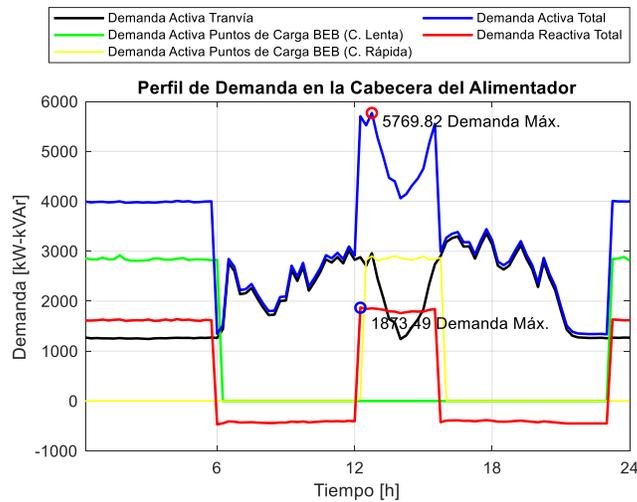


Figura 6.31. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para el Escenario 3.
Fuente: Propia del Autor.

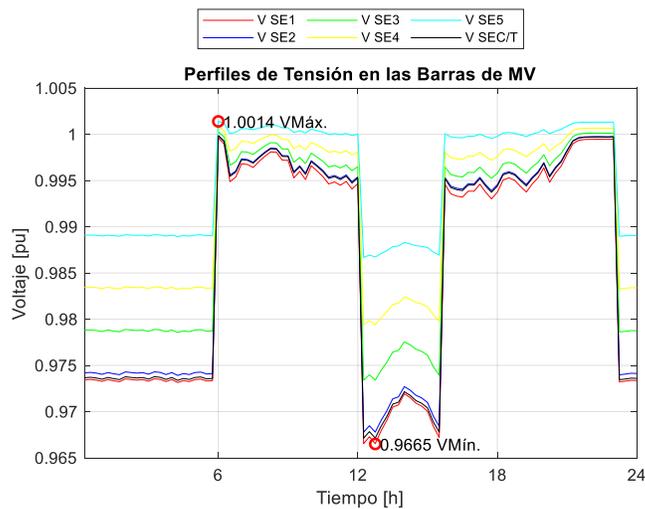


Figura 6.32. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para el Escenario 3.
Fuente: Propia del Autor.

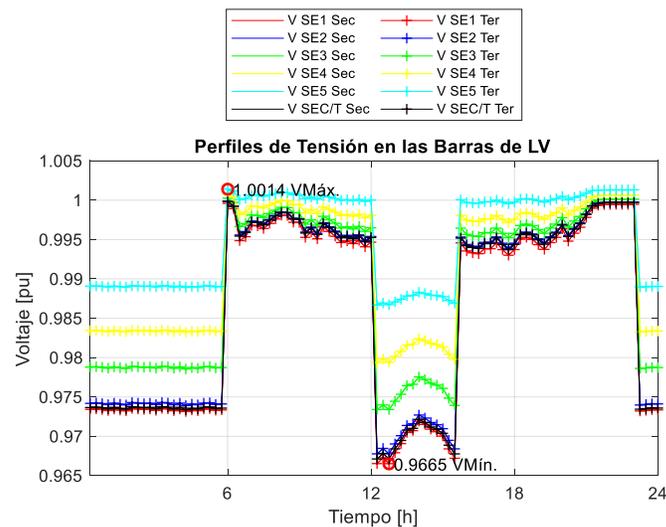


Figura 6.33. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para el Escenario 3.
Fuente: Propia del Autor.

6.7.4. Cuarto Escenario:

En este escenario se plantean dos posibilidades para la carga exclusiva de EV.

6.7.4.1. Escenario 4.1:

Como se resume en la figura 6.34, se considerará únicamente la carga rápida de vehículos eléctricos en las estaciones de servicio y de transferencia, para un total de 5 puntos de carga y manteniendo las 19 cargas en cada uno de ellos dando un total de 95 en todo el día considerando el período de 05h00 a 23h30.

Los resultados obtenidos de demanda máxima y niveles de voltaje se pueden observar en las figuras 6.35, 6.36 y 6.37. La demanda máxima de este escenario es de 6.23 MW y el consumo energético de 159 MWh. El voltaje cae hasta los 0.972 pu en las barras de MT y a la salida del transformador de tracción en BT en el período de mayor demanda. Las pérdidas en el circuito alcanzan los 78 kW y el factor de potencia es de 0.997.

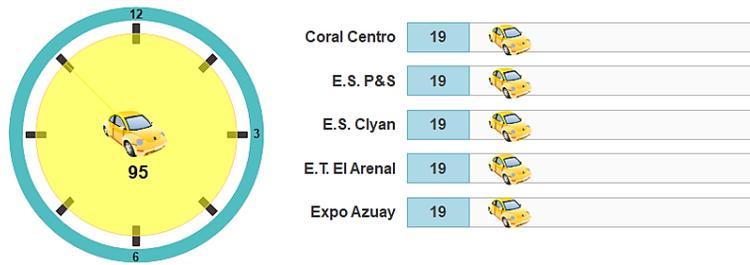


Figura 6.34. Rangos horarios y número de puntos de carga para el Escenario 4.1.
Fuente: Propia del Autor.

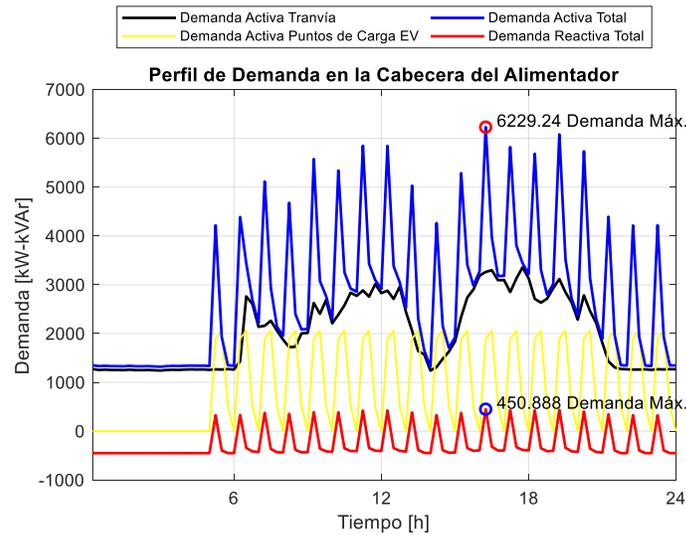


Figura 6.35. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para el Escenario 4.1.
Fuente: Propia del Autor.

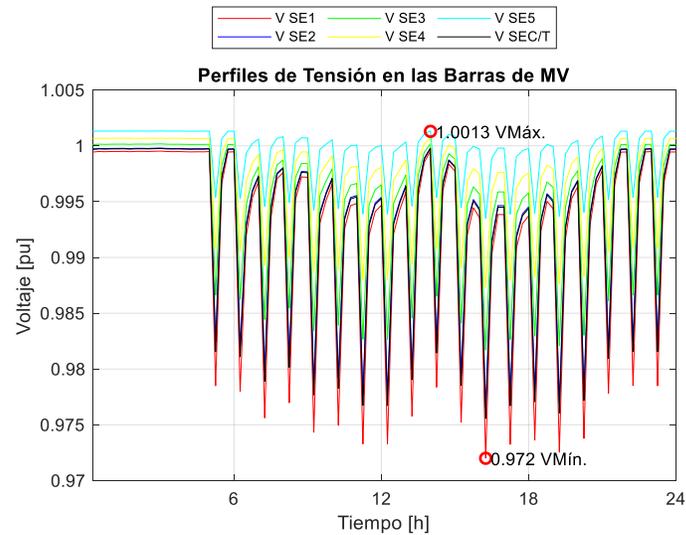


Figura 6.36. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para el Escenario 4.1.
Fuente: Propia del Autor.

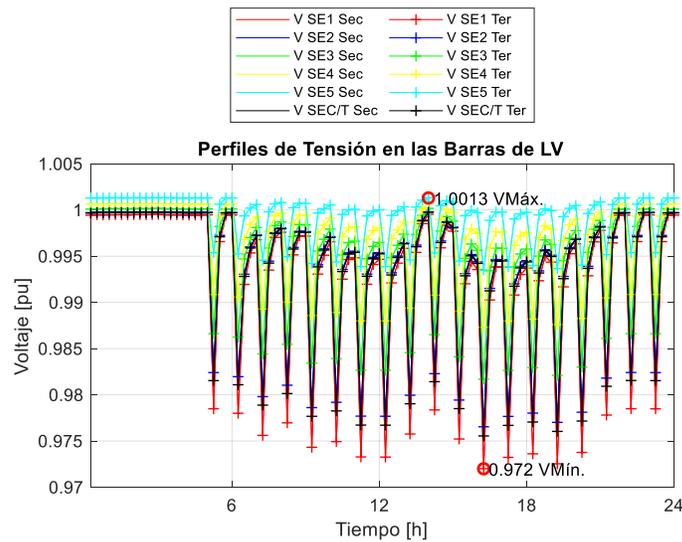


Figura 6.37. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para el Escenario 4.1.
Fuente: Propia del Autor.

6.7.4.2. Escenario 4.2:

Si se duplica el número de unidades que pueden acceder a la carga rápida en relación al escenario 4.1 como lo resume la figura 6.38 se tendría dos electrolinerías en cada punto de carga para un total de 10, estimando un total de 190 recargas en el día desde las 5h00 hasta las 23h00. Los resultados de la simulación se observan en las figuras 6.39, 6.40 y 6.41 para la demanda del sistema eléctrico y niveles de voltaje en las barras de MV y LV respectivamente. La demanda máxima de este escenario es de 7.80 MW y el consumo energético de 178 MWh. El voltaje cae hasta los 0.919 pu en las barras de MT y a la salida del transformador de tracción en BT en el período de mayor demanda. Las pérdidas en el circuito alcanzan los 78 kW y el factor de potencia es de 0.831.

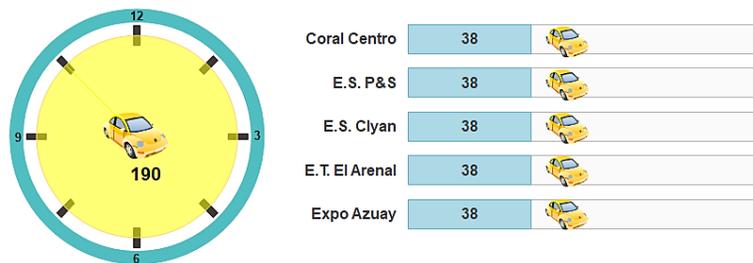


Figura 6.38. Rangos horarios y número de puntos de carga para el Escenario 4.2.
Fuente: Propia del Autor.

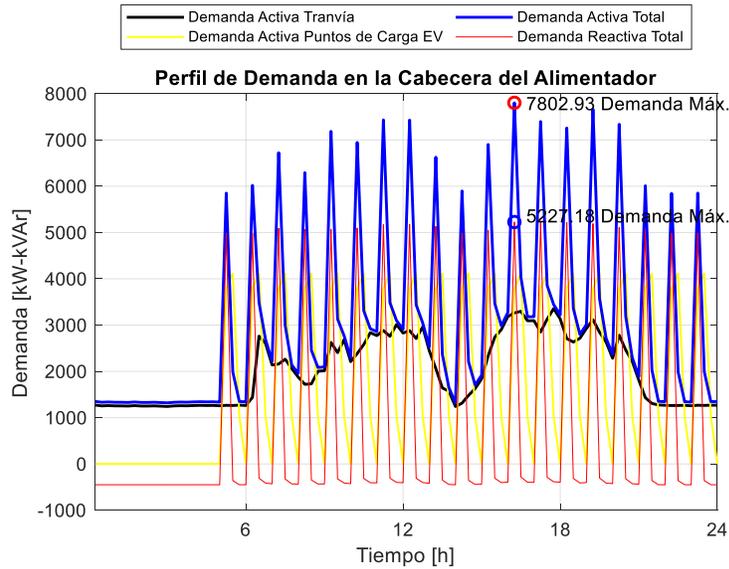


Figura 6.39. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para el Escenario 4.2.
Fuente: Propia del Autor.

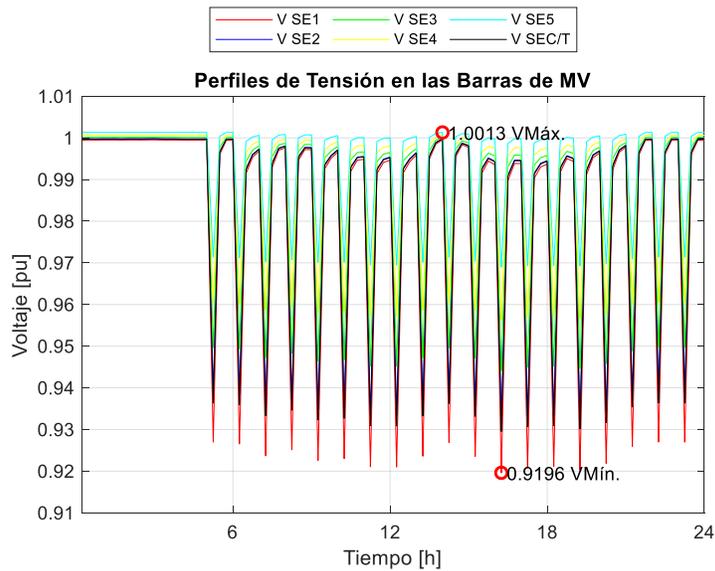


Figura 6.40. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para el Escenario 4.2.
Fuente: Propia del Autor.

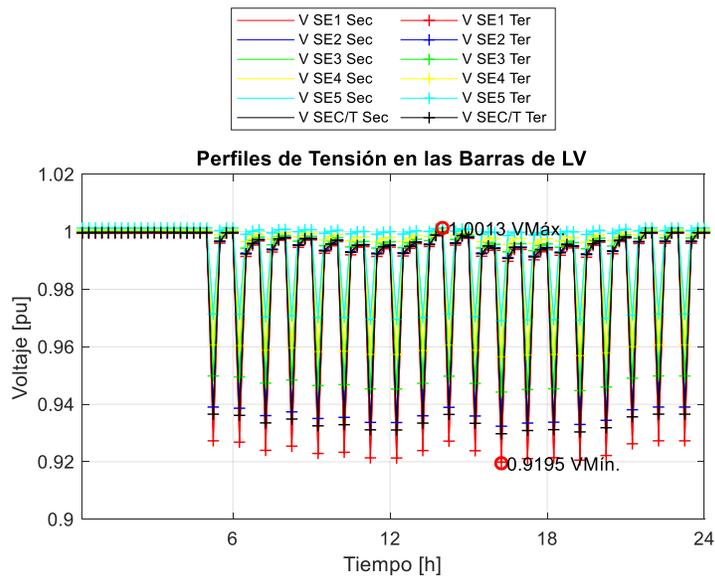


Figura 6.41. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para el Escenario 4.2.
Fuente: Propia del Autor.

6.7.5. Quinto Escenario:

En este escenario se plantean dos posibilidades para la carga rápida exclusiva de BEB.

6.7.5.1. Escenario 5.1:

En este escenario como se resume en la figura 6.42, se considera la carga rápida de BEB en las instalaciones de las estaciones de transferencia y Expo Azuay. Para ello se cuenta con 6 electrolinerías en cada punto de carga, para un total de 18 unidades que pueden realizar recargas parciales de sus baterías en el periodo considerado para este propósito que va desde las 12h00 hasta las 16h00 aproximadamente.

Los resultados obtenidos de la simulación se pueden apreciar en la figura 6.43 para su perfil de demanda a nivel de alimentador y perfiles de voltaje a nivel de MV y LV en las barras de las SE en las figuras 6.44 y 6.45 respectivamente. La demanda máxima de este escenario es de 4.23 MW y el consumo energético de 129 MWh. El voltaje cae hasta los 0.987 pu en las barras de MT y a la salida del transformador de tracción en BT en el período de mayor demanda. Las pérdidas en el circuito alcanzan los 75 kW y el factor de potencia es de 0.998.

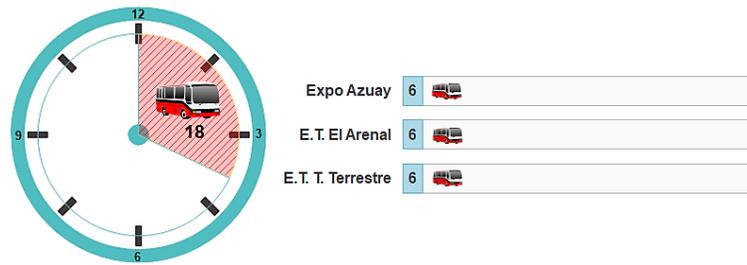


Figura 6.42. Rangos horarios y número de puntos de carga para el Escenario 5.1.
Fuente: Propia del Autor.

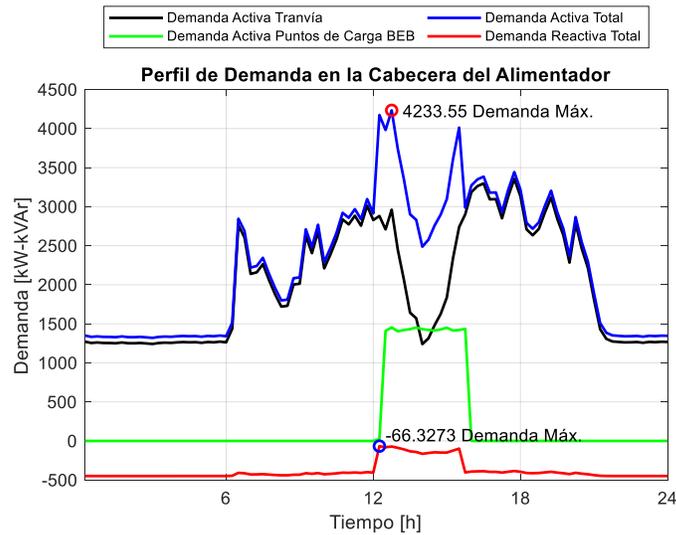


Figura 6.43. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para el Escenario 5.1.
Fuente: Propia del Autor.

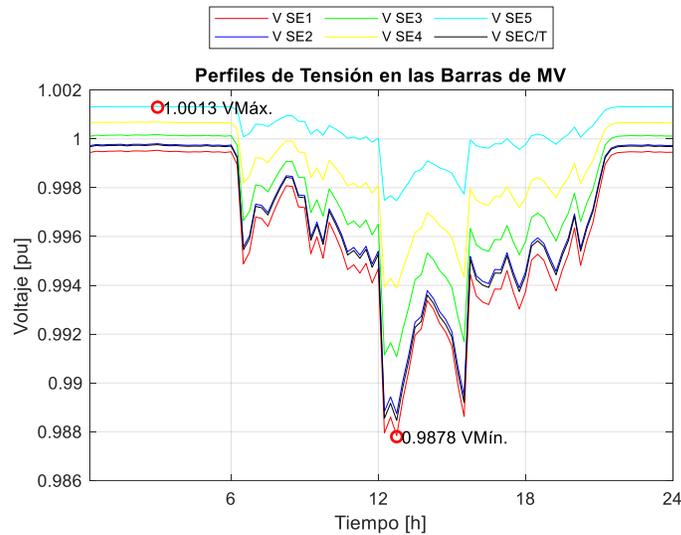


Figura 6.44. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para el Escenario 5.1.
Fuente: Propia del Autor.

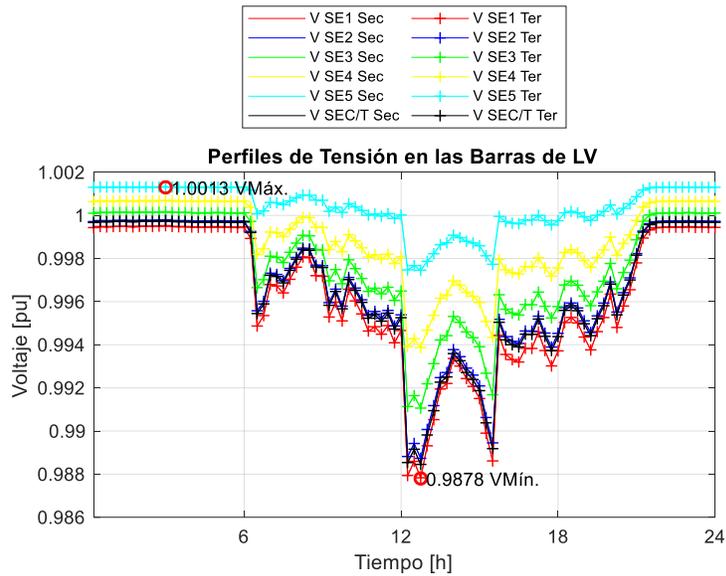


Figura 6.45. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para el Escenario 5.1.
Fuente: Propia del Autor.

6.7.5.2. Escenario 5.2:

En este escenario y tal como lo resume la figura 6.46, se considera duplicar las electrolineras a 12 en cada punto de carga para abastecer a una flota de 36 BEB, que pueden recargar parcialmente sus baterías en el horario de 12h00 a 16h00. Los perfiles de demanda y de voltaje se aprecian en las figuras 6.47, 6.48 y 6.49. La demanda máxima de este escenario es de 5.86 MW y el consumo energético de 133 MWh. El voltaje cae hasta los 0.9813 pu en las barras de MT y a la salida del transformador de tracción en BT en el período de mayor demanda. Las pérdidas en el circuito alcanzan los 78 kW y el factor de potencia es de 0.996.

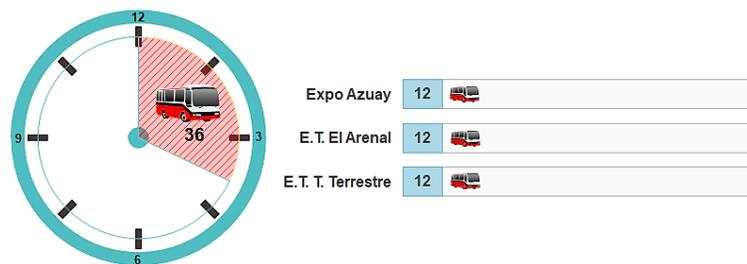


Figura 6.46. Rangos horarios y número de puntos de carga para el Escenario 5.2.
Fuente: Propia del Autor.

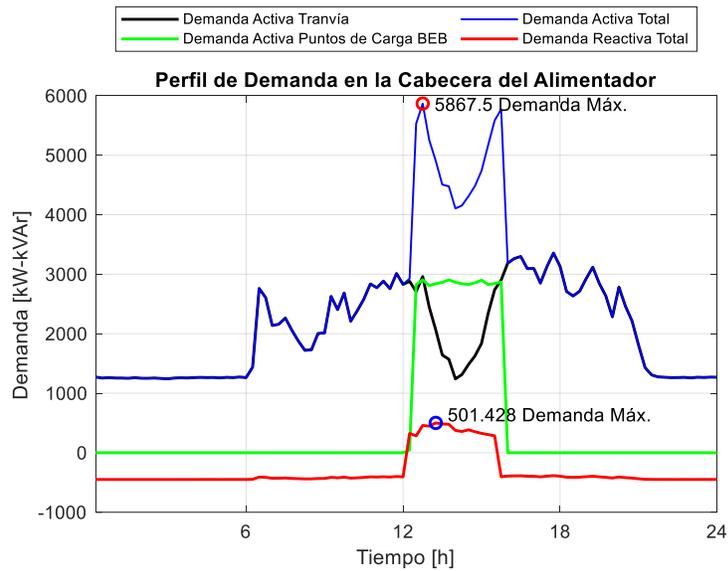


Figura 6.47. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para el Escenario 5.2.
Fuente: Propia del Autor.

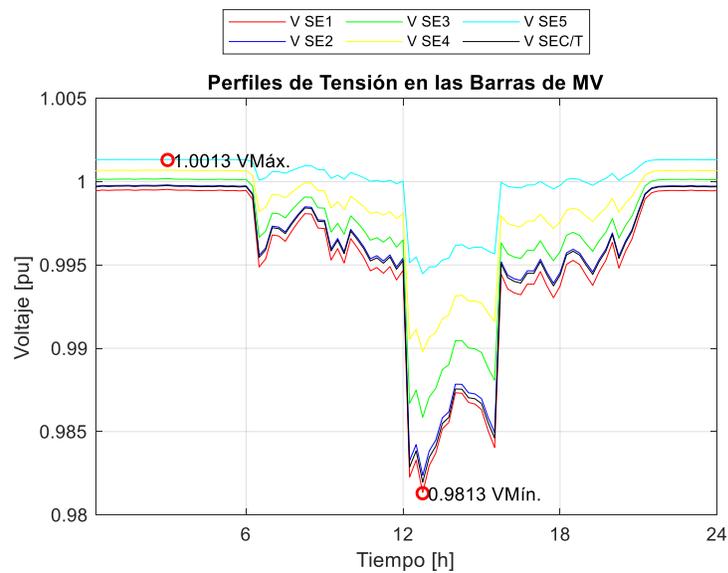


Figura 6.48. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para el Escenario 5.2.
Fuente: Propia del Autor.

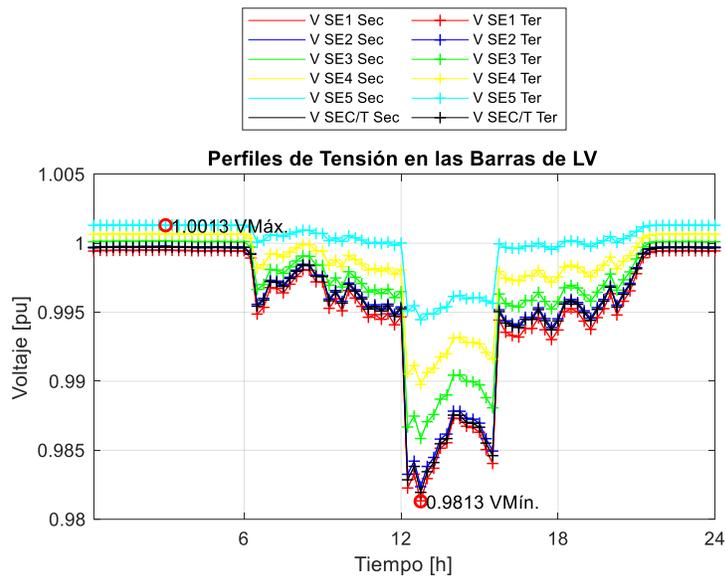


Figura 6.49. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para el Escenario 5.2.
Fuente: Propia del Autor.

6.7.6. Sexto Escenario:

Para este escenario se considerarán tres opciones para la carga lenta de BEB.

6.7.6.1. Escenario 6.1:

Tal como lo indica la figura 6.50, la primera opción a simular es un escenario con carga lenta de BEB en los puntos de carga en las estaciones de transferencia y Expo Azuay. En este caso se dispone de 12 electrolinerías en cada punto de carga para un total de 36 unidades que puede cargar sus baterías en el período de 22h00 a 06h00.

Los resultados de la simulación se evidencian en las siguientes figuras en donde se observa el perfil de demanda en la figura 6.51, y sus perfiles de voltaje en MV y LV en las figuras 6.52 y 6.53 respectivamente. La demanda máxima de este escenario es de 3.44 MW y el consumo energético de 142 MWh. El voltaje cae hasta los 0.988 pu en las barras de MT y a la salida del transformador de tracción en BT en el período de mayor demanda. Las pérdidas en el circuito alcanzan los 431 kW y el factor de potencia es de 0.996.

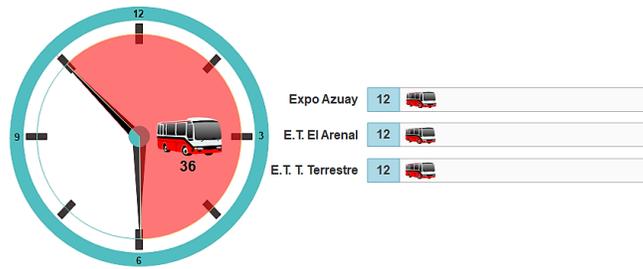


Figura 6.50. Rangos horarios y número de puntos de carga para el Escenario 6.1.
Fuente: Propia del Autor.

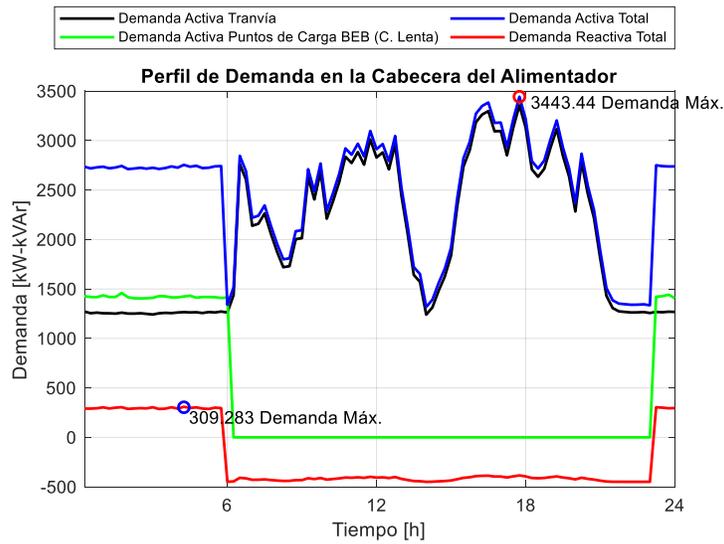


Figura 6.51. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para el Escenario 6.1.
Fuente: Propia del Autor.

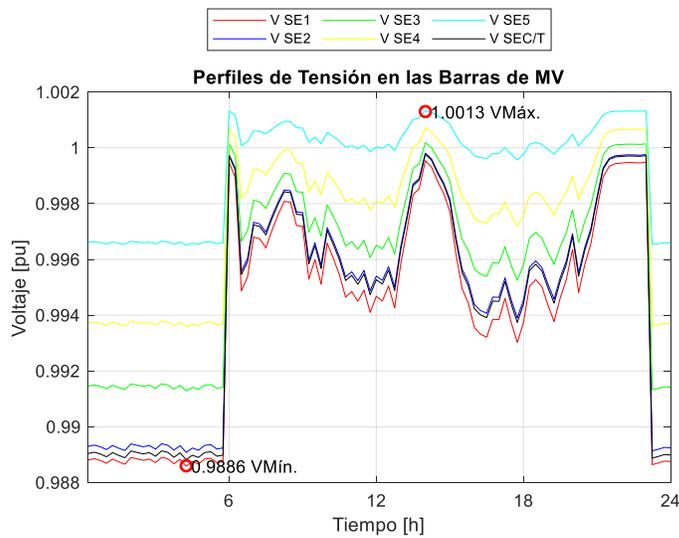


Figura 6.52. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para el Escenario 6.1.
Fuente: Propia del Autor.

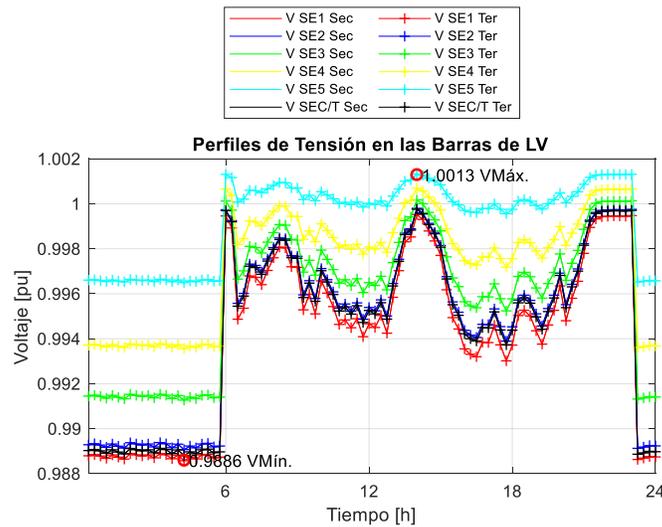


Figura 6.53. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para el Escenario 6.1.
Fuente: Propia del Autor.

6.7.6.2. Escenario 6.2:

En este escenario se duplican el número de electrolineras para la carga lenta de BEB en los mismos puntos de carga considerados en el escenario anterior. Así se tiene una flota de 72 unidades recargando sus baterías durante la noche y madrugada, repartidos 24 en las instalaciones de Expo Azuay y 24 en cada estación de transferencia tal como lo resume la figura 6.54.

Los resultados obtenidos se presentan en las figuras 6.55, 6.56 y 6.57, para el perfil de demanda a nivel de alimentador y perfiles de voltaje en MV y LV. La demanda máxima de este escenario es de 4.10 MW y el consumo energético de 164 MWh. El voltaje cae hasta los 0.972 pu en las barras de MT y a la salida del transformador de tracción en BT en el período de mayor demanda. Las pérdidas en el circuito alcanzan los 1,796 kW y el factor de potencia es de 0.917.

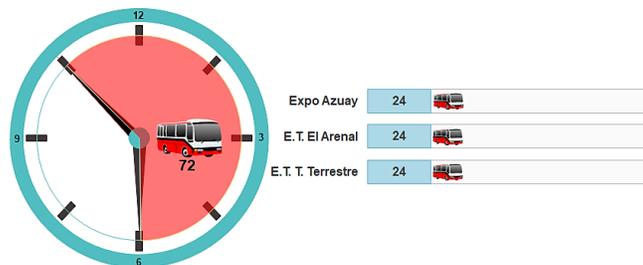


Figura 6.54. Rangos horarios y número de puntos de carga para el Escenario 6.2.
Fuente: Propia del Autor.

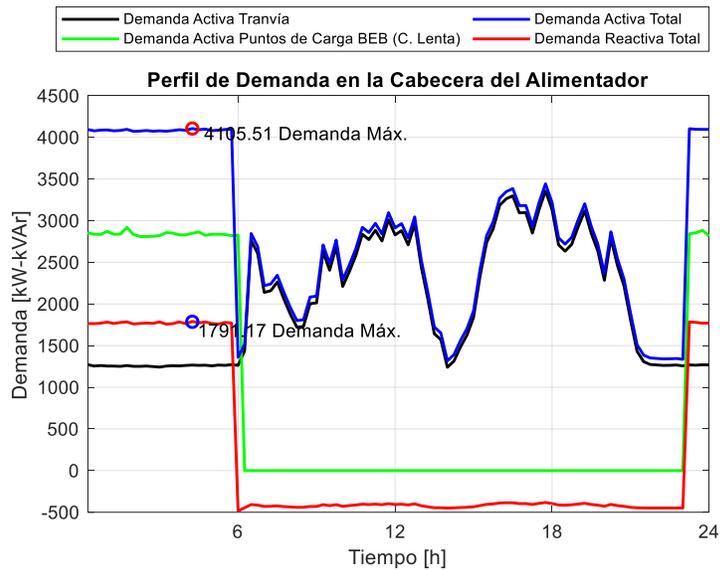


Figura 6.55. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para el Escenario 6.2.
Fuente: Propia del Autor.

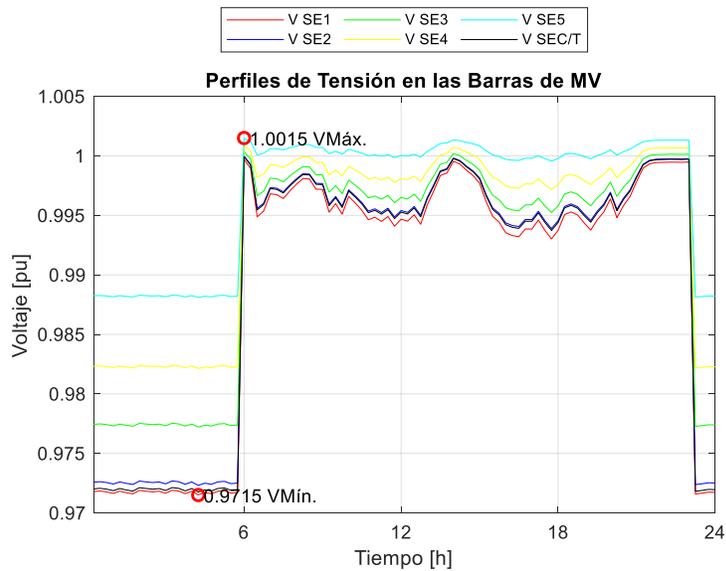


Figura 6.56. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para el Escenario 6.2.
Fuente: Propia del Autor.

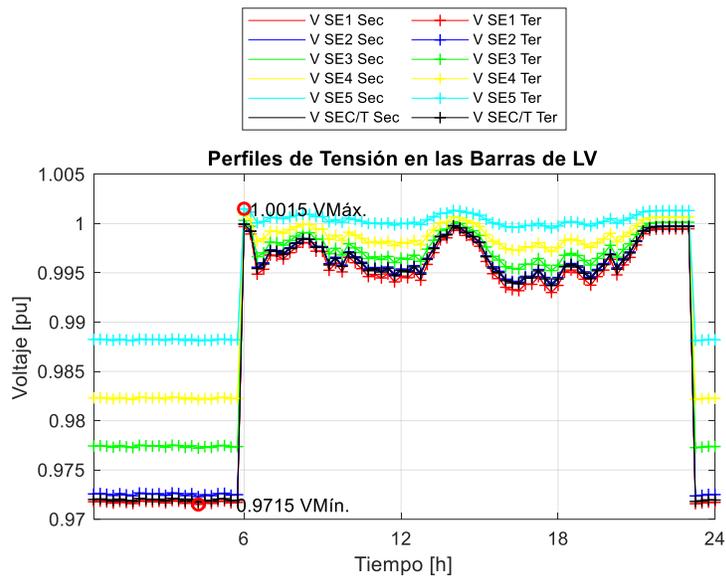


Figura 6.57. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para el Escenario 6.2.
Fuente: Propia del Autor.

6.7.6.3. Escenario 6.3:

En este escenario se consideran los mismos puntos de carga del escenario 1 y el incremento de dos transformadores dentro o en las inmediaciones de la SE-C/T. Esto con la finalidad de tener a una flota de 36 BEB recargando sus baterías en las instalaciones de Expo Azuay y 24 unidades en cada estación de transferencia, para un total de 60 unidades, que realizan su recarga lenta en el horario de 23h00 a 06h00 considerado para este tipo de carga. Esta información que resume en la figura 6.58.

Como resultado de la simulación obtenemos los perfiles de demanda y voltaje que se indican en las figuras 6.59, 6.60 y 6.61 respectivamente. Además, la demanda máxima de este escenario es de 3.78 MW y el consumo energético de 158 MWh. El voltaje cae hasta los 0.985 pu en las barras de MT y a la salida del transformador de tracción en BT en el período de mayor demanda. Las pérdidas en el circuito alcanzan los 616 kW y el factor de potencia es de 0.999.

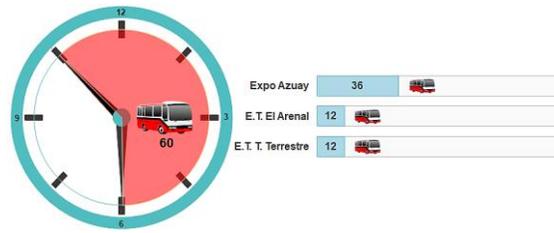


Figura 6.58. Rango Horario y número de unidades en el Escenario 6.3.
Fuente: Propia del Autor.

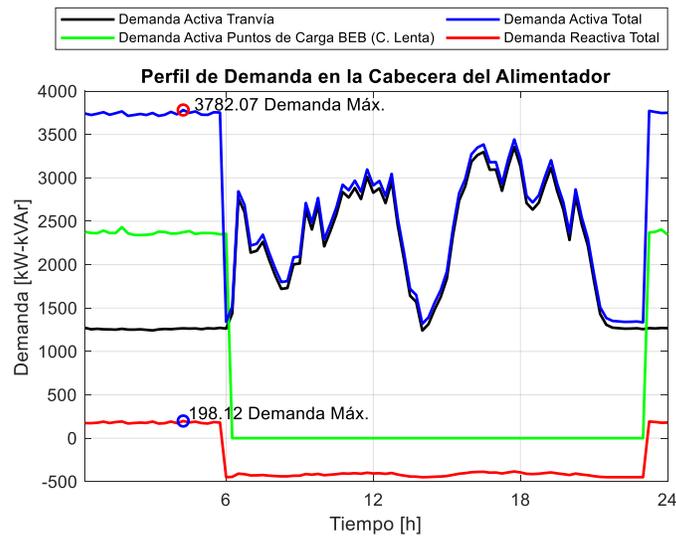


Figura 6.59. Perfiles de Demanda de Potencia Activa y Reactiva del Sistema para el Escenario 6.3.
Fuente: Propia del Autor.

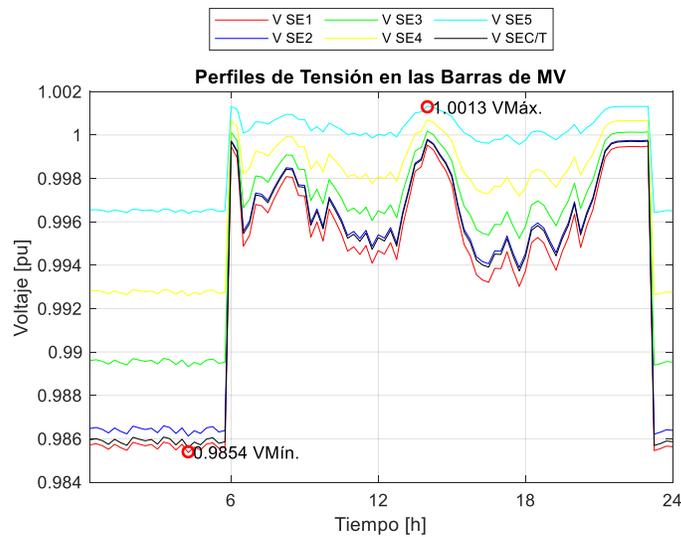


Figura 6.60. Perfiles de Voltaje en las barras de MV de las SE del Tranvía para el Escenario 6.3.
Fuente: Propia del Autor.

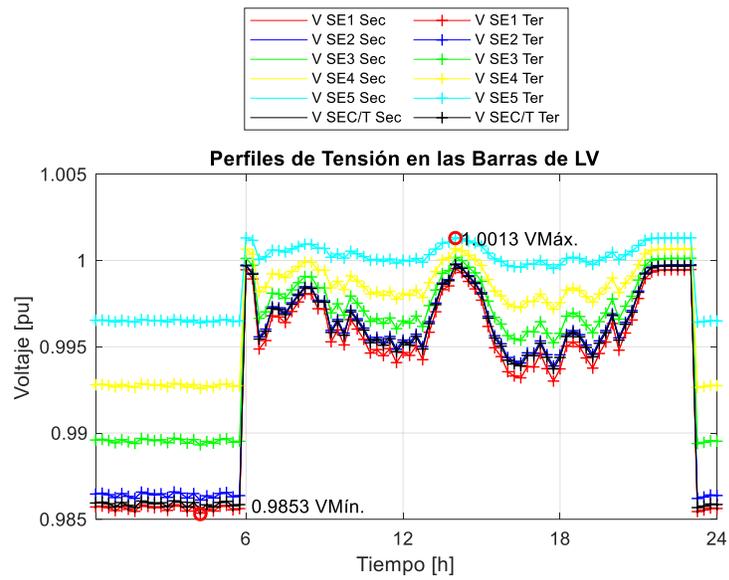


Figura 6.61. Perfiles de Voltaje en las barras de LV de las SE del Tranvía para el Escenario 6.3.
Fuente: Propia del Autor.



7. Factibilidad técnica para la incorporación de estaciones de carga al sistema eléctrico de alimentación del tranvía

7.1. Introducción

En este capítulo se determina la factibilidad técnica para la incorporación de estaciones de carga a la red eléctrica de alimentación del tranvía mediante el análisis de los impactos generados en la red. Este análisis se basa en los resultados obtenidos de las simulaciones de los diez escenarios operativos considerados, en donde se integran las electrolineras a la red eléctrica de alimentación del tranvía. Los parámetros eléctricos considerados para el análisis son por un lado, aquellos que lo indica la Regulación Nro. ARCONEL 053/18 en relación a la calidad de la energía, como niveles de voltaje y factor de potencia. Otros de los parámetros eléctricos considerados en este estudio son la demanda máxima, el consumo energético y pérdidas de potencia en el circuito. Del análisis de los parámetros eléctricos considerados, se determina que escenarios prestan las mejores condiciones técnicas operativas, y cuales se descartan al provocar impactos negativos en la operación de la red eléctrica. Otro análisis considerado en este capítulo es la estimación del ahorro de emisiones de GEI a la atmósfera que se produce si se implementaran los escenarios sugeridos.

7.2. Calidad de la Energía

La energía eléctrica es el principal insumo de funcionamiento del Sistema Tranviario ya que se trata de un sistema de transporte de tracción 100% eléctrico y por tal motivo demanda de una energía continua y de calidad (sin perturbaciones) para su correcto funcionamiento. Es por ello



que se requiere por parte de las empresas generadoras y comercializadora de este insumo que sea entregado al usuario final en las mejores condiciones de forma continua y sobre todo de calidad, ya que un suministro intermitente y de baja calidad de la energía eléctrica puede causar pérdidas económicas y productivas.

Las principales causas para que la energía no sea entregada de forma continua y en óptimas condiciones son debidas a las variaciones del nivel del voltaje, perturbaciones en la red eléctrica (flicker y armónicos) y un bajo factor de potencia por la ubicación distante de las cargas con respecto al transformador eléctrico de distribución, la operación (arranque y parada) de maquinaria industrial como los motores de mediana y gran potencia, y la saturación de cargas (clientes) en el sistema de distribución eléctrico, elementos que se podrían presentar en la operación del tranvía por su demanda y tipo de cargas conectadas a la red de distribución de la empresa distribuidora.

Para garantizar a los consumidores un suministro eléctrico continuo y confiable, las empresas distribuidoras dentro de su área de concesión están obligadas a cumplir con la Regulación sobre la Calidad del Servicio Eléctrico de Distribución No. ARCONEL – 053/18 [55], que establece los estándares mínimos de calidad y procedimientos técnicos de medición y evaluación a los que deben someterse para la prestación del servicio eléctrico de distribución.

7.3. Regulación No. ARCONEL – 053/18

La regulación vigente establece que es necesario asegurar un nivel satisfactorio de la prestación de los servicios eléctricos de manera continua y confiable, para lo cual se han planteado determinadas disposiciones legales establecidas en la Ley de Régimen del Sector Eléctrico y sus reformas, el Reglamento Sustitutivo del Reglamento General de la Ley de Régimen del Sector Eléctrico, el Reglamento de Concesiones, Permisos y Licencias para la Prestación del Servicio de Energía Eléctrica, el Reglamento de Suministro del Servicio de Electricidad y el Reglamento de Tarifas aprobadas por el ARCONEL y por instructivos y procedimientos dictados por los distribuidores de conformidad con este Reglamento que se convertirán en una garantía del continuo y eficiente suministro de energía eléctrica a los consumidores finales.



Las Empresas Eléctricas del país con la finalidad de entregar energía de calidad a sus clientes, cumplen con la Regulación ARCONEL 053/18 que contempla la toma de mediciones y mantenimiento de una base de datos de parámetros eléctricos de sus instalaciones y componentes de la red asociados a la alimentación eléctrica de ciertos índices de calidad tales como:

- Nivel de voltaje.
- Perturbaciones de voltaje.
- Factor de Potencia.

El levantamiento y almacenamiento de la información para la determinación de los índices de calidad son de completa responsabilidad de la empresa distribuidora por un período de al menos 3 años de tal forma que sean suficientes para que el ARCONEL controle el cumplimiento de las disposiciones establecidas en la presente regulación.

7.3.1. Índices de calidad del producto. Nivel de Voltaje:

La calidad de voltaje se determina como las variaciones de los valores eficaces (rms) medidos en un período no menor a 7 días continuos en intervalos de medición de 10 minutos con relación al voltaje nominal en los diferentes niveles [55]. Las variaciones de voltaje admitidas con respecto al valor del voltaje nominal son aquellos que se presentan en la tabla 7.1.

Tabla 7.1. Niveles de Variación de Voltaje Permitidos con respecto al Voltaje Nominal según Regulación Nro. ARCONEL - 053/18.

Fuente: Regulación Nro. ARCONEL – 053/18 [55].

NIVEL DE VOLTAJE	RANGO	VARIACIÓN
Alto voltaje [HV]	$HV > 40 \text{ Kv}$	$\pm 5\%$
Medio voltaje [MV]	$0.60 \text{ kV} \leq MV \leq 40 \text{ kV}$	$\pm 6\%$
Bajo voltaje. Urbanas [LV]	$LV \leq 0.60 \text{ kV}$	$\pm 8\%$
Bajo voltaje. Rurales [LV]		$\pm 8\%$

7.3.2. Índices de calidad del producto. Factor de Potencia:

Con respecto al factor de potencia del sistema, si el 5% o más de las mediciones del período evaluado es inferior al límite preestablecido que es de 0.92, el consumidor está incumpliendo con



este índice de calidad. Las mediciones se realizarán durante 7 días continuos en períodos de 10 minutos.

7.4. Análisis de la demanda de la red eléctrica integral de transporte público en los distintos escenarios operativos

En la tabla 7.2 se puede observar la demanda de potencia activa y reactiva diaria para cada uno de los escenarios simulados. Se observa que la demanda en los escenarios inicial y horizonte de diseño prácticamente concuerdan con los valores sugeridos en [31] y expuestos en la tabla 4.1, corroborando la veracidad de la implementación planteada en la simulación.

Respecto a la simulación de los escenarios en donde se han incluido las electrolineras a la red eléctrica del tranvía, se observa que la demanda en todos los escenarios se mantiene dentro del máximo que se puede obtener de los alimentadores 0428 y 0528 que abastecen al sistema del tranvía que es de 8MW. El escenario de mayor demanda corresponde al 4.2 con 7.803 MW, en donde se han considerado dos estaciones de carga rápida para los EV en los puntos de carga como estaciones de servicio, estación de transferencia el Arenal, Expo Azuay y Coral Centro. De acuerdo al resultado en este escenario se deberá abastecer con los alimentadores de forma simultánea para cubrir la demanda requerida, caso contrario en un escenario de contingencia en donde se contemple la salida de uno de los alimentadores, no se podrá suplir la carga requerida.

Los escenarios en donde se puede cubrir la demanda únicamente con uno de los alimentadores son el 6.1 y 6.3, en donde se plantea la carga lenta de BEB exclusivamente con una potencia máxima de 3.44 MW para el escenario 6.1 y 3.78 MW para el 6.3, teniendo una mejor opción en este último ya que el número de estaciones de carga para BEB es mayor. La demanda que también podría ser cubierta por un solo alimentador, aunque con un exceso del 3% de su capacidad (4.10 MW), es el escenario 6.2 en donde se propone duplicar el número de electrolineras en los puntos de carga del escenario 6.1 para atender a una flota de 72 BEB en total en modo de carga lenta.



Tabla 7.2. Valores de Demanda Máxima de Potencia Activa y Reactiva para los distintos Escenarios Simulados.
Fuente: Propia del Autor.

ESCENARIO	DEMANDA MÁXIMA	
	POTENCIA ACTIVA [kW]	POTENCIA REACTIVA [kVAr]
INICIAL DE DISEÑO	3268	1038
HORIZONTE DE DISEÑO	3744	1272
HORIZONTE CON DEMANDA PERÍODO DE PRUEBAS	3427	-385
1	7050	708
2	6213	634
3	5770	1874
4.1	6229	451
4.2	7803	5227
5.1	4233	-66
5.2	5868	501
6.1	3443	309
6.2	4106	1791
6.3	3782	198

7.5. Análisis de la energía eléctrica consumida por la red eléctrica integral de transporte público en los distintos escenarios operativos

En la tabla 7.3 se observan los valores de la energía activa y reactiva consumida por el sistema integral de transporte público eléctrico planteado para cada uno de los escenarios simulados. Se presenta el mayor consumo energético (185 MWh) diario en el tercer escenario de simulación, que corresponde a la carga rápida y lenta de BEB exclusivamente. El menor consumo (129 MWh) se identifica en el escenario 5.1 en donde se ha planteado la carga rápida de 18 BEB únicamente.

Tabla 7.3. Valores de Consumo Energético para los distintos Escenarios Simulados.
Fuente: Propia de Autor.

ESCENARIO	ENERGÍA CONSUMIDA	
	ENERGÍA ACTIVA [MWh]	ENERGÍA REACTIVA [MVarh]
INICIAL DE DISEÑO	150	419
HORIZONTE DE DISEÑO	167	499
HORIZONTE CON DEMANDA PERÍODO DE PRUEBAS	118	-259



1	169	-154
2	178	-134
3	185	247
4.1	159	-173
4.2	178	295
5.1	129	-235
5.2	133	-194
6.1	142	-141
6.2	164	90
6.3	158	-164

7.6. Análisis de las pérdidas de potencia en la red eléctrica integral de transporte público en los distintos escenarios operativos

En la tabla 7.4 se presentan las pérdidas totales que se generarían en el sistema eléctrico para cada uno de los escenarios simulados. Se evidencia que la mayor cantidad de kW que se disipan está relacionado a los transformadores, en relación a las líneas de MV y LV. En los escenarios de diseño inicial y horizonte se tiene la misma cantidad de pérdidas (77 kW) que corresponden a un 5% del total de la demanda del circuito. De igual forma, cuando se considera la demanda del período de pruebas del tranvía para realizar la simulación, se obtiene 62 kW de pérdidas que equivalen de igual manera a un 5% de la demanda total.

Ya en los escenarios de operación planteados para el sistema integral del tranvía, se obtienen menos pérdidas en los escenarios 1, 4.1, 4.2, 5.1 y 5.2 alcanzando los 78 kW y 75 kW que corresponden a un 6% del total de la demanda del circuito. Estos valores pueden ser considerados como aceptables dentro de la operación del sistema tranviario, por lo que, en relación a las pérdidas, conviene considerar cualquiera de los tres escenarios. Sin embargo, se puede evidenciar un importante valor de las pérdidas en los escenarios 3 y 6.2. En estos escenarios se alcanzan pérdidas en el orden de los 1634 kW y 1796 kW que corresponden a un 69% y 78% respectivamente de la demanda total de las cargas del circuito. Se registra un incremento significativo de las pérdidas en las líneas de LV, ya que a pesar de que los puntos de carga han sido escogidos en las inmediaciones de las SE de tracción del tranvía, las distancias de las acometidas subterráneas hacia las electrolineras están en el orden de unos cientos de metros, lo que hace que las pérdidas en estas líneas se incrementen y alcancen los valores mencionados.



Tabla 7.4. Valores de Pérdidas de Potencia en el Circuito para los distintos Escenarios Simulados.
Fuente: Propia de Autor.

ESCENARIO	PÉRDIDAS DE POTENCIA				POTENCIA TOTAL DE LA CARGA [kW]	PÉRDIDAS EN EL CIRCUITO [%]
	LÍNEAS [kW]	TRANSF. [kW]	ACTIVA [kW]	REACTIVA [kVAr]		
INICIAL DE DISEÑO	9.1	67.9	77	-339	1423	5
HORIZONTE DE DISEÑO	9.1	67.9	77	-339	1423	5
HORIZONTE CON DEMANDA PERÍODO DE PRUEBAS	3.5	58.6	62	-449	1268	5
1	3.6	74.6	78	-449	1268	6
2	216.0	84.4	300	-191	2255	13
3	1483.6	150.6	1634	1255	2363	69
4.1	3.6	74.6	78	-449	1268	6
4.2	3.6	74.6	78	-449	1268	6
5.1	3.6	74.6	75	-449	1268	6
5.2	3.6	74.6	78	-449	1268	6
6.1	340.8	90.3	431	-48	2308	18
6.2	1637.2	159.0	1796	1428	2299	78
6.3	517.3	99.0	616	180	3134	20

7.7. Análisis de niveles de voltajes en las Barras de MV y LV de la red eléctrica integral de transporte público en los distintos escenarios operativos

Considerando los rangos de variación de voltaje permisibles según la regulación Nro. ARCONEL-053/18 con respecto a su valor nominal, que es de $\pm 6\%$ para MV y $\pm 8\%$ para LV, se tiene que el rango establecido para la operación del sistema eléctrico del tranvía está entre 20.68 kV (0.94 pu) y 23.32 kV (1.06 pu) considerando un voltaje nominal de 22 kV (1 pu) en MV; y entre 542.8 V (0.92 pu) y 637.2 V (1.08 pu) para un voltaje nominal de 590 V (1pu) en el nivel de LV.

De acuerdo a los datos registrados en la tabla 7.5, de los valores tomados de los perfiles de voltaje, se evidencia que en MV no se supera el valor máximo establecido en la regulación. Se tiene un valor de 21.84 kV o 0.998 pu para los escenarios inicial y horizonte de diseño y 22.03 kV o 1.00 pu para los demás escenarios de simulación que en todos los casos. Este valor se registra en la barra de la SE más cercana a la fuente, que en este caso es la 5. Para los valores



mínimos en las barras de MV, se tiene que en casi todos los escenarios se mantienen niveles por encima del mínimo establecido. Sin embargo, en el escenario 4.2 el voltaje cae a los 20.24 kV o 0.92 pu que está por debajo del mínimo establecido en la Regulación. Este nivel se da en la barra más alejada de la fuente que es en la SE 1.

De los datos obtenidos de los perfiles de voltaje en LV, en ninguno de los escenarios se supera el nivel máximo, estableciéndose en 588.82 V o 0.998 pu en el escenario inicial y 575.25 o 0.975 pu para el horizonte de diseño y 590.78 V o 1 pu en los demás escenarios. En relación a los valores mínimos, los escenarios inicial y horizonte de diseño tienen valores de voltaje que caen por debajo del nivel mínimo establecido hasta los 538 V o 0.911 pu para el escenario inicial y 536 V o 0.908 pu para el de horizonte de diseño, situación que se presenta en la SE-C/T.

Se observa además que en el escenario 4.2 el voltaje cae hasta 542.8 V o 0.92 pu, justo en el límite del mínimo establecido por la Regulación, situación que se dan en las barras de LV de la SE 1. De estos resultados se puede concluir que los niveles de voltaje en las distintas barras de MV y LV del circuito de alimentación del tranvía para los diferentes escenarios simulados cumplen con los rangos establecidos en la Regulación que norma la calidad de la energía en este tipo de instalaciones de distribución a excepción del escenario 4.2.

Tabla 7.5. Niveles de Voltaje en las Barras de MV y LV en los Escenarios Simulados.
Fuente: Propia de Autor.

ESCENARIO	MEDIO VOLTAJE		BAJO VOLTAJE	
	V MÁXIMO [pu]	V MÍNIMO [pu]	V MÁXIMO [pu]	V MÍNIMO [pu]
INICIAL DE DISEÑO	0.998	0.980	0.998	0.911
HORIZONTE DE DISEÑO	0.998	0.977	0.975	0.908
HORIZONTE CON DEMANDA PERÍODO DE PRUEBAS	1.000	0.993	1.000	0.993
1	1.000	0.967	1.000	0.967
2	1.000	0.972	1.000	0.972
3	1.000	0.967	1.000	0.967
4.1	1.000	0.972	1.000	0.972
4.2	1.000	0.920	1.000	0.920
5.1	1.000	0.988	1.000	0.988
5.2	1.000	0.981	1.000	0.981
6.1	1.001	0.989	1.001	0.989
6.2	1.000	0.972	1.000	0.972
6.3	1.000	0.985	1.000	0.985



7.8. Análisis del factor de potencia de la red eléctrica integral de transporte público en los distintos escenarios operativos

Tal como lo evidencian los datos de la tabla 7.6, en el escenario 4.2 el factor de potencia del circuito cae a un valor de 0.831 que está por debajo de los establecido en la Regulación que es de 0.92, mientras que en el escenario 6.2 el valor se mantiene justo en el límite, situación que se debe a que en estos escenarios las simulaciones reflejan un importante consumo desde la red eléctrica de potencia reactiva de las distintas cargas. Así, en el escenario 4.2 se consumen 5.22 MVar, mientras que en el escenario 6.2 se tiene una demanda de 1.80 MVar, como lo corroboran los datos presentados en la tabla 7.2 provocando que el factor de potencia caiga a valores por debajo del mínimo requerido.

Tabla 7.6. Factor de Potencia en el Circuito para los Escenarios Simulados.
Fuente: Propia de Autor.

ESCENARIO	FP
INICIAL DE DISEÑO	0.953
HORIZONTE DE DISEÑO	0.947
HORIZONTE CON DEMANDA PERÍODO DE PRUEBAS	0.994
1	0.995
2	0.995
3	0.951
4.1	0.997
4.2	0.831
5.1	0.998
5.2	0.996
6.1	0.996
6.2	0.917
6.3	0.999

7.9. Comparación de resultados obtenidos y determinación del escenario operativo más adecuado

Los criterios escogidos para establecer cuál de los escenarios operativos es el más idóneo técnicamente en base a los resultados obtenidos de las distintas simulaciones tienen relación con su demanda, consumo energético y calidad de la energía eléctrica. Para ello, los parámetros analizados de acuerdo a los estudios presentados en el estado del arte como [16] y [21] y en cumplimiento con la Regulación Nro. ARCONEL 053/18 [55] son: el factor de utilización, demanda máxima, energía consumida, pérdidas de potencia, niveles de voltaje en las barras de MV y LV y factor de potencia del circuito simulado.

El escenario en donde se tiene un mayor factor de utilización promedio de acuerdo a la figura 7.1, es el 4.2, alcanzando un valor de 98%. Desde este punto de vista, lo convierte en el más adecuado, ya que se tiene un mayor aprovechamiento de la demanda disponible para el sistema eléctrico del tranvía, siempre que este sea abastecido por los dos alimentadores en condiciones normales de operación. Otros escenarios con un elevado factor de demanda, pero en menor grado son el escenario 1 con 88%, el 2 y 4.1 con 78% y el escenario 3 con 72%.

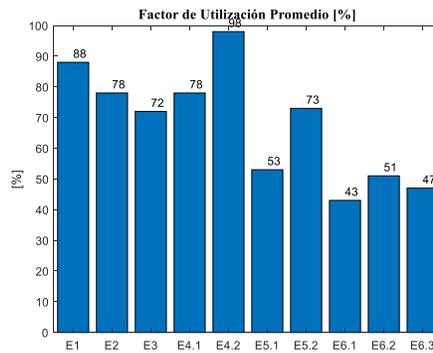


Figura 7.1. Factor de Utilización para los Escenarios Simulados.
Fuente: Propia de Autor.

En relación a la demanda máxima, se observa en las figuras de los perfiles de demanda para los escenarios en donde se considera la carga rápida de EV (1, 2, 4.1 y 4.2), que su perfil es muy irregular produciéndose picos muy pronunciados de demanda en todas las horas en las que se ha determinado la carga. Esta situación se puede evidenciar en la figura 7.2, en donde se presentan los valores de demanda máxima promedio para cada escenario de simulación. Sin embargo, en ningún escenario se sobrepasa la demanda máxima destinada para el sistema que es de 8 MW.

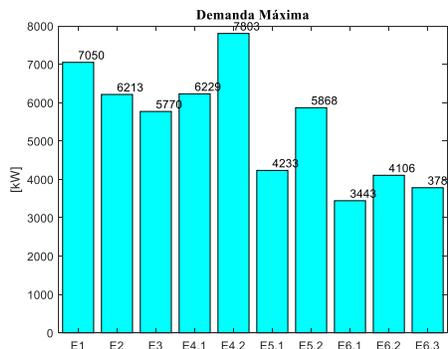


Figura 7.2. Demanda Máxima Promedio para cada Escenario.
Fuente: Propia de Autor.

Para solventar esta situación se podría reducir la potencia de carga, pero afectaría el tiempo que les tomaría a los EV realizar este proceso, lo cual no sería conveniente ya que los usuarios estarían obligados a permanecer mucho más tiempo estacionados lo que productivamente no sería factible. Otra solución viable para reducir los picos y tratar de aplanar la curva de demanda es la compensación integrando a las barras de MV del sistema generación distribuida, bancos de baterías o supercondensadores. Los escenarios en donde se tiene un perfil de demanda más plano y con menos irregularidades es el sexto (6.1, 6.2 y 6.3) y quinto (5.1 y 5.2) convirtiéndolos desde este punto de vista en los más recomendables. El escenario con la menor demanda diaria es 6.1 con 3.443 MW que lo convierte en el más idóneo técnicamente en relación a este criterio.

El mayor consumo energético se presenta en el escenario 3 de acuerdo a los resultados de la figura 7.3, seguido por el 2 y 4.2, mientras que el menor se da en el escenario 5.1. Sin embargo, al hacer una relación del consumo con la cantidad de unidades que pueden acceder a la carga, se tiene que, en el escenario en donde se cargan el mayor número de EV es el 4.2 (190 unidades que acceden a la carga rápida en todo el día). En el escenario en el que se recargan la mayor cantidad de BEB es el 3 (108 unidades entre carga rápida y lenta durante todo el día) y en el que acceden una combinación de carga para EV y BEB corresponde al 2 (131 unidades, 95 EV y 36 BEB) justificando el mayor consumo energético en relación a los otros escenarios modelados. Si se prioriza únicamente el número de BEB que pueden acceder a la carga, el escenario 3 considera a una flota de 108 unidades entre carga lenta y rápida por lo que sería el más factible bajo estas consideraciones, seguido del escenario 6.2 que permite la recarga lenta de 72 unidades y con un consumo muy parecido el escenario 6.3 caracterizado por la carga lenta de 60 unidades, considerado también como factible.

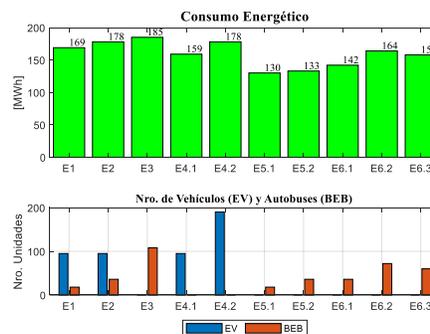


Figura 7.3. Consumo Energético y Nro. de Unidades consideradas.
Fuente: Propia de Autor.

En lo que se refiere a las pérdidas de potencia, de acuerdo a los resultados registrados en la figura 7.4, se tiene un menor porcentaje de pérdidas totales en el circuito en los escenarios 1, 4.1, 4.2, 5.1 y 5.2 (6%), que les convierte en los escenarios más idóneos, seguidos por el 2 (13%) y 6.1 (18%). De la misma figura se puede distinguir que los escenarios 3 y 6.2 presentan un importante porcentaje de pérdidas totales (69% y 78% respectivamente) con respecto a la demanda total del circuito, por lo que desde esta perspectiva no deberían ser considerados como idóneos.

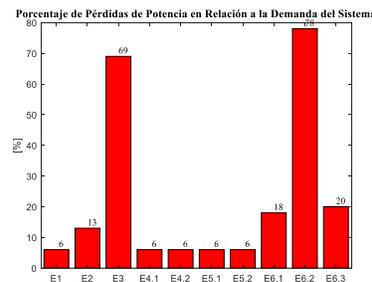


Figura 7.4. Porcentaje de Pérdidas de Potencia Totales del Circuito por Escenario.

Fuente: Propia de Autor.

Estudiando los perfiles de voltaje y factor de potencia del circuito cuyos niveles se presentan en la figura 7.5, existe un escenario (4.2) cuyo nivel de voltaje en barras de MV está por debajo, y en barras de LV está en el límite del valor mínimo establecido por la Regulación, por lo que, en relación a este aspecto, no sería un escenario factible de implementar. Considerando el factor de potencia del circuito de la misma figura 7.5 se evidencia que dos escenarios (4.2 y 6.2) tienen un factor de potencia por debajo del límite mínimo requerido para garantizar una adecuada calidad de la energía en el circuito, por lo que desde este punto de vista estos no serían escenarios a considerar.

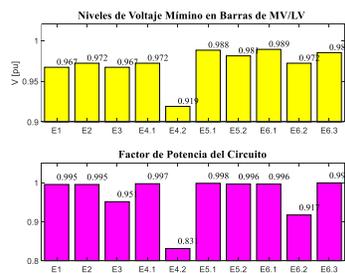


Figura 7.5. Niveles de Voltaje y Factor de Potencia del Circuito para los distintos Escenarios.

Fuente: Propia de Autor.



Considerando los resultados obtenidos en este análisis a partir de las simulaciones en cada uno de los escenarios planteados, se trata de cuantificar de alguna manera cada uno de estos criterios técnicos (factor de utilización, demanda máxima, consumo energético, pérdidas de potencia, niveles de voltaje y factor de potencia) y establecer el escenario más factible técnicamente de implementar. Para este propósito, se asigna un porcentaje para cada criterio técnico analizado. Así se concede para cada criterio un porcentaje del 100% para aquel que represente la mejor opción técnica y 0% para aquel criterio que técnicamente no se lo puede considerar. Además, la mejor opción técnica se tomará como referencia para cuantificar al resto en menor grado (entre 0% y 100%) de acuerdo a su similitud con la referencia.

En la tabla 7.7 se resume los resultados de la cuantificación realizada de cada criterio técnico según el escenario simulado en relación la mejor opción técnica. Haciendo un promedio de las relaciones, se deduce que el escenario 1 con un promedio del 88% es el más indicado técnicamente de implementar, debido a su alto factor de demanda, bajo consumo energético, menor cantidad de pérdidas y niveles de voltaje en las barras de MV y LV y factor de potencia por encima del valor referencial mínimo establecido en la Regulación. En promedio le sigue el escenario 4.1 cuyas características son su alto factor de utilización, bajo nivel de demanda y consumo energético y bajo porcentaje de pérdidas totales. El escenario menos indicado para implementar es el 6.2 (promedio de 54%) debido a su bajo factor de utilización, elevada demanda, pérdidas de potencia excesivas en el circuito y factor de potencia por debajo del valor mínimo establecido por la Regulación.

Tabla 7.7. Cuantificación de los Criterios Técnicos para cada Escenario Simulado.
Fuente: Propia del Autor.

ESC.	Factor Utilización		Demanda Máxima		Consumo Energético		Pérdidas de Potencia		Niveles de Voltaje		Factor de Potencia		Prom.
	[%]	Relación [%]	[kW]	Relación [%]	[MWh]	Relación [%]	Circuito [%]	Relación [%]	Mín. [pu]	Relación [%]		Relación [%]	
1	88%	90%	7050	49%	169	91%	6%	100%	0.967	97%	0.995	99%	88%
2	78%	80%	6213	55%	178	96%	13%	46%	0.972	97%	0.995	99%	79%
3	72%	74%	5770	60%	185	100%	69%	0%	0.967	97%	0.951	95%	71%
4.1	78%	80%	6229	55%	159	86%	6%	100%	0.972	97%	0.997	100%	86%
4.2	98%	100%	7803	44%	178	96%	6%	100%	0.920	0%	0.831	0%	57%
5.1	53%	54%	4233	81%	129	70%	6%	100%	0.988	99%	0.998	100%	85%
5.2	73%	75%	5868	59%	133	72%	6%	100%	0.981	98%	0.996	100%	85%
6.1	43%	44%	3443	100%	142	77%	18%	33%	0.989	99%	0.996	100%	76%
6.2	51%	53%	4106	84%	164	88%	78%	0%	0.972	97%	0.917	0%	54%
6.3	47%	48%	3782	91%	158	85%	20%	30%	0.985	99%	0.999	100%	75%

Este análisis se aprecia de mejor manera en la figura 7.6, en donde se resumen los resultados de la cuantificación y el peso asignado a cada criterio técnico en relación al promedio total para cada escenario simulado.

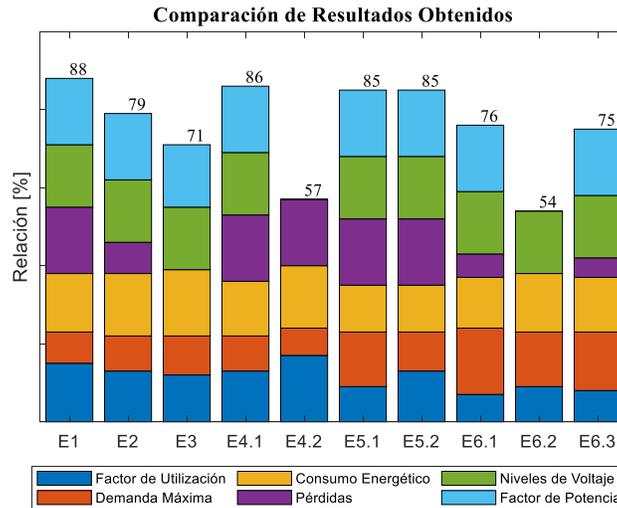


Figura 7.6. Comparación de Resultados Obtenidos en la Cuantificación de los Criterios de Selección. Fuente: Propia del Autor.

7.10. Reducción de emisiones de GEI en los escenarios simulados

De acuerdo al estudio de emisiones de GEI presentado en [32], las emisiones per cápita del Cantón Cuenca son de 2.42 t de CO₂e/habitante, cuyo principal sector emisor es el de movilidad con un 57% del total que asciende a 1'180,155 t de CO₂e/año de acuerdo a la figura 7.6, que está asociado con el consumo de combustibles de vehículos privados y públicos, es decir, el sector transporte en la ciudad de Cuenca generan 672,688 t de CO₂e/año.

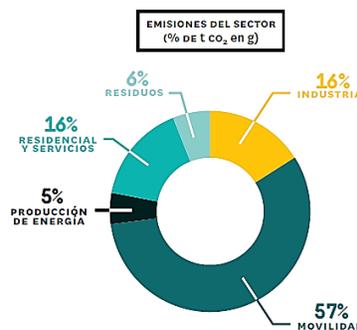


Figura 7.7. Sectores Emisores de GEI en el Cantón Cuenca. Fuente: Cuenca: Ciudad Sostenible / Plan de acción [32].



Con el fin de reducir las emisiones de GEI en el sector movilidad, se han planteado en [32] varias líneas de acción como: desincentivar el uso de vehículo privado y fomentar los desplazamientos en modos más sostenibles, fomentar vehículos privados y públicos con menos emisiones por usuario y reducir las necesidades de movilidad. En base a estos lineamientos, se han considerado diversas acciones como la construcción del tranvía que pretende reducir a 71,103 TEP/año hasta el año 2050 en relación al consumo de la energía proveniente de combustibles fósiles y 212,838 t de CO₂e/año proveniente de las emisiones de GEI, implementar el sistema integrado de transporte para el año 2020 que reduciría el consumo energético de combustible en 8,231 TEP/año y 24,469 t de CO₂e/año de GEI e impulsar la adquisición de buses de energías alternativas que reduciría en 446 TEP/año el consumo energético proveniente de combustibles y 323 t de CO₂e/año de GEI.

Si se considera la implementación del escenario 1 de simulación tomado como el técnicamente más factible, se reemplazarían 95 unidades EV como taxi y una flota de 18 BEB por los autobuses de combustión interna en el actual sistema de transporte público de la ciudad de Cuenca. Los EV y BEB recargarían sus baterías en las estaciones de carga colocadas a lo largo de la ruta tranviaria de acuerdo al escenario planteado. Para determinar la reducción de emisiones de GEI si se implementa el escenario 1, se ha considerado la información y proceso planteado en [56], obteniendo los resultados expuestos en la tabla 7.8, de donde se observa que, entre todas las unidades se dejarían de emitir 5,838 t de CO₂e/año. Esto equivaldría a una reducción del 0.87% en relación al total generado por el sector transporte en la ciudad.

Si se implementarán otros escenarios factibles que consideran la carga exclusiva de BEB, como el escenario 5.2 (carga rápida de 16 BEB) y el escenario 6.3 (carga lenta de 60 BEB), se tiene una reducción también menor al 1% (0.54% y 0.90% respectivamente) en relación al total generado por el sector transporte en Cuenca. De estos resultados se concluye que la reducción de GEI de los escenarios simulados no es significativa en comparación con el total generado tomado como referencia. Sin embargo, si se considera el reemplazo de toda la flota de taxi (3,553 unidades) y autobuses (475 unidades) de combustión interna que prestan su servicio comercial de transporte público en la ciudad por unidades de tracción eléctrica, se tiene una reducción significativa de emisiones de GEI en el orden del 30%. En base a este resultado que se muestra



en la tabla 7.8, se evidencia que si se reemplaza la flota de taxi y autobuses por EV y BEB en el sistema de transporte público, se consigue una reducción importante de emisiones de GEI justificando la recomendación de una transición hacia la movilidad eléctrica en la ciudad de Cuenca.

Tabla 7.8. Determinación de la Reducción de Emisiones de GEI en el Escenario 1 de Simulación y en reemplazo del actual sistema de transporte público en la ciudad de Cuenca.

Fuente: Guía Práctica para el Cálculo de Emisiones de GEI [56] y Propia del Autor.

DESCRIPCIÓN	Escenario 1 de simulación		Reemplazo de todo el Sistema de Transporte Público	
	Taxi	Autobús	Taxi	Autobús
Kg de CO ₂ e / Litro de Combustible	2.38	2.61	2.38	2.61
Consumo de combustible / día [L]	49.17	103.83	49.17	103.83
t de CO ₂ e /año	42.71	99	42.71	99
Nro. De Unidades que reemplazan	95	18	3,553	475
Total de Emisiones [t de CO ₂ e /año]	4,058	1,780	151,763	47,704
TOTAL [t de CO₂ e /año]	5,838		199,467	
Reducción en relación al total generado por el sector transporte [%]	0.87		30	



8. Conclusiones y recomendaciones

8.1. Conclusiones

La transición hacia la movilidad eléctrica requiere abordar grandes desafíos de integración a la red eléctrica, como los relacionados con la congestión de la red, incremento de la demanda máxima, variaciones en los niveles de voltaje e incremento de las pérdidas de potencia.

La ciudad de Cuenca debe pensar en la transición de su actual sistema de transporte público a una solución ecológica y sostenible como la movilidad eléctrica, en cumplimiento con la Ley Orgánica de Eficiencia Energética, que establece el marco regulatorio para el uso obligatorio de transporte público urbano de tracción eléctrica a partir del año 2025; ya que en la actualidad, la movilidad en la ciudad está fuertemente ligada con la transportación motorizada como el autobús y el auto particular a motores de combustión interna.

La falta de una adecuada y suficiente infraestructura de carga para EV y BEB en la ciudad dificulta la transición hacia la movilidad eléctrica de su sistema de transporte público actual, por lo que se hace necesario buscar alternativas viables e innovadoras al problema. El aprovechamiento de la infraestructura eléctrica del sistema tranviario mediante la incorporación de estaciones de carga al sistema eléctrico de alimentación del tranvía pretende ser una solución viable a considerar, ya que su factor de utilización es del 47%.

Para justificar la transición hacia la movilidad eléctrica y evidenciar sus ventajas, se realiza un estudio energético comparando el consumo y eficiencia energética de los vehículos de combustión utilizados como transporte en la ciudad y sus símiles eléctricos.



Se determina que los EV como el Kia Soul EV y BYD E5 que prestan actualmente el servicio de taxi en el país, tienen un menor consumo y una mayor eficiencia en un 944% aproximadamente en relación a los ICE. Así se ha estimado que un taxi en un día de operación comercial en la ciudad consume 136.53 kWh/100 km, mientras que las unidades eléctricas 15.82 kWh/100 km. En relación a la eficiencia, se ha determinado que una unidad convencional puede recorrer 0.73 km/kWh, mientras que una unidad eléctrica permite recorrer 7.54 km/kWh.

En relación a los autobuses convencionales de combustión y los BEB, se ha determinado que los de combustión presentan un mayor consumo energético en un 361% con respecto a los eléctricos, que está en el orden de 478.08 kWh/100 km en comparación con los 132.62 kWh/100 km y una eficiencia energética menor en un 312% considerando los 0.25 km/kWh para el de combustión interna y los 0.78 km/kWh del BEB.

Realizando una comparación entre las unidades de transporte masivo de tracción eléctrica, el tranvía presenta un consumo energético mayor en un 36% y una menor eficiencia en un 9% en relación al BEB en la ruta tranviaria.

En relación al consumo energético por pasajero el tranvía tiene un consumo superior por pasajero en el orden de 3.71 kWh/pasajero mientras que el autobús presenta un consumo de 0.27 kWh/pasajero, casi un 1374% más debido a la mayor acogida entre los usuarios del autobús en relación a la cantidad de pasajeros que tuvo el tranvía en su período de pruebas.

El software de libre acceso OpenDSS en conjunto con MATLAB han permitido determinar la factibilidad técnica de incorporar estaciones de carga a la red eléctrica de alimentación del sistema tranviario, mediante la implementación y simulación de flujos de carga determinísticos del circuito eléctrico en diez escenarios operativos para la carga de EV y BEB a distintos niveles de potencia y rangos horarios.



No todos los escenarios simulados cumplen con las especificaciones de la Regulación Nro. ARCONEL 053/18 en relación a la calidad del producto referente a niveles de voltaje en barras de MV y LV y factor de potencia. Así se descartan los escenarios 3, 4.2 y 6.2 que no cumplen con los requisitos mínimos.

Sin embargo, se ha determina que el escenario 1 que propone electrolinerías para la carga rápida a 400 kW de 95 EV, que acceden a la carga desde las 05h00 hasta las 23h30 cada media hora en las instalaciones del Coral Centro, Expo Azuay y estaciones de servicio y de transferencia, y de 18 BEB en las instalaciones de Expo Azuay y estaciones de transferencia para la carga rápida a 80 kW en un rango horario desde las 12h00 a 16h00 aproximadamente, es el más idóneo técnicamente por su alto factor de utilización que se incrementa al 88%, su bajo consumo energético de 169 MWh/día, su nivel de demanda máxima de 7,050 kW que no supera el máximo que pueden entregar los alimentadores y un porcentaje de pérdidas del 6% del total de la demanda de la carga que corresponde a 78 kW.

Si se quisiera considerar únicamente electrolinerías para la carga de una flota de BEB, se deberían considerar el escenario 5.2 que modela la carga rápida de una flota de 36 BEB para aquellas unidades que requieran recargas parciales durante el día en el horario de 12h00 a 16h00, y el escenario 6.3 que estima la carga lenta de 60 BEB en el horario de 23h00 a 7h00 en el que el tranvía no se encuentra operativo.

Si se implementa el escenario 1 en reemplazo de 95 taxis y 18 autobuses del sistema de transporte público actual, se tendría un ahorro de combustible para el estado de 776.4 TEP/año y se dejarían de emitir 5,838 t de CO₂e/año que equivaldrían a una reducción del 0.87% del total generado por el sector transporte en la ciudad.

Si se realiza la transición hacia un sistema integral de transporte público eléctrico, las emisiones de GEI podrían reducirse en un 30% en relación al total generado por el sector del



transporte en la ciudad, convirtiéndose en una solución efectiva hacia el cambio de la matriz energética del país y sobre todo mejorar la calidad de vida de sus habitantes.

8.2. Recomendaciones

Desde el punto de vista de consumo y eficiencia energética, resulta una solución más rentable la operación comercial de una flota de BEB en reemplazo de las unidades de combustión actuales y del sistema tranviario, que tendrá que masificar su utilización entre los usuarios y la ciudadanía en general para ser competente energéticamente frente a los BEB como los estudiados en este trabajo.

Es factible técnicamente la incorporación de estaciones de carga a la red eléctrica de alimentación del tranvía, por lo que la Municipalidad de Cuenca en conjunto con la Unidad Ejecutora del Proyecto Tranvía, deberían impulsar la implementación de un sistema integral de transporte público eléctrico, en donde se integren EV, BEB y que tenga al tranvía como su principal integrador.

La reducción de emisiones de GEI no es significativa si se llega a implementar uno de los escenarios técnicamente idóneos. Sin embargo, una renovación de toda la flota del actual sistema de transporte público representa una reducción importante de las emisiones y consumo de combustibles fósiles, razón válida para justificar la transición hacia la movilidad eléctrica.

Desde la experiencia de este estudio y como nuevas líneas de investigación se proponen la implementación y simulación de este proyecto en un software de análisis diferente para establecer similitudes y diferencias del actual estudio. Realizar un nuevo análisis con datos de una operación comercial real del sistema tranviario, y proponer la factibilidad de otros escenarios



operativos, o validar los resultados mostrados en este estudio. Determinar la factibilidad técnica de otros escenarios operativos en donde los puntos de carga se abastezcan energéticamente desde la catenaria del sistema tranviario.



Referencias

- [1] M. G. Mechthild Wörsdörfer, Pierpaolo Cazzola, “Global EV Outlook 2019 to electric mobility,” *International Energy Agency (IEA)*, 2019.
- [2] G. Mañez, E. Bermúdez, and M. Araya, “Movilidad eléctrica: Avances en América Latina y el Caribe y Oportunidades para la colaboración regional,” *ONU Medio Ambient*. 2018.
- [3] “Electric Mobility: Opportunities For Latin America,” *United Nations Environment Programme (UNEP)*, p. 81, 2016.
- [4] F. L. Allen, W. O’Neill, F. L. Allen, and W. O’Neill, *The Automobile Revolution*. 2019.
- [5] “Reglamento para la Aplicación de la Ley Orgánica para el Fomento Productivo,” *Decreto Ejecutivo No. 617, Presidencia de la República del Ecuador*, pp. 1–62, 2018.
- [6] “Ley orgánica de eficiencia energética,” *Asam. Nac. del Ecuador. Regist. Of. N° 449*, 2019.
- [7] W. Jaramillo, “Taxis eléctricos en la ciudad de Loja - Electric taxis in the city of Loja-Ecuador,” *Revista Espacios*, no. 2013, Loja, p. 27, Jun. 2019.
- [8] CAF, “The subway that will change Quito,” 2019. <https://www.caf.com/en/currently/news/2019/04/why-the-new-quito-subway-will-change-life-in-the-city/>.
- [9] BYD, “Guayaquil entra de lleno a la movilidad eléctrica con incentivos a los transportistas y nueva flota de buses eléctricos BYD,” 2019. <https://bydelectrico.com/guayaquil-entra-de-lleño-a-la-movilidad-electrica-con-incentivos-a-los-transportistas-y-nueva-flota-de-buses-electricos-byd/>.
- [10] L. Isla, M. Singla, M. Rodríguez-Porcel, and I. Granada, “Análisis de tecnología, industria y mercado para vehículos eléctricos en América Latina y Caribe,” *BID*, p. 78, 2019.
- [11] D. Blacio and J. Palacios, *Estimación de la energía requerida para la sustitución de la flota de autobuses públicos por autobuses eléctricos de la Ciudad de Cuenca*, vol. 1, no. 5. 2013.
- [12] Wikipedia, “Tranvía de Cuenca.”
- [13] IRENA, *Hydrogen From Renewable Power: Technology outlook for the energy*



transition, no. September. 2018.

[14] A. Caballero, “Guía de movilidad eléctrica para las entidades locales,” *Red Eléctrica España*, p. 32, 2019.

https://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/Guia_movilidad_electrica_para_entidades_locales.pdf.

[15] Clinton Climate Initiative, “Low carbon technologies can transform Latin America’s bus fleets. Lessons from the C40-CCI Hybrid & Electric Bus Test Program: Hybrid and electric technologies are a viable solution to reduce carbon emissions in the world’s megacities,” *BID*, p. 50, 2018.

[16] J. Quirós-Tortós, L. Ochoa, and T. Butler, “How electric vehicles and the grid work together: Lessons learned from one of the largest electric vehicle trials in the world,” *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 16, no. 6, pp. 64–76, 2018, doi: 10.1109/MPE.2018.2863060.

[17] H. S. Salama, S. M. Said, I. Vokony, and B. Hartmann, “Impact of Different Plug-in Electric Vehicle Categories on Distribution Systems,” *2019 7th Int. Istanbul Smart Grids Cities Congr. Fair*, pp. 109–113, 2019.

[18] N. Banol Arias, S. Hashemi, P. B. Andersen, C. Traeholt, and R. Romero, “Distribution System Services Provided by Electric Vehicles: Recent Status, Challenges, and Future Prospects,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 20, no. 12, pp. 4277–4296, 2019, doi: 10.1109/TITS.2018.2889439.

[19] S. Hajforoosh, M. A. S. Masoum, and S. M. Islam, “Online optimal variable charge-rate coordination of plug-in electric vehicles to maximize customer satisfaction and improve grid performance,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 141, no. Vcc, pp. 407–420, 2016, doi: 10.1016/j.epsr.2016.08.017.

[20] D. Stahleder, D. Reihls, S. Ledinger, and F. Lehfuss, “Impact Assessment of High Power Electric Bus Charging on Urban Distribution Grids,” *IECON 2019 - 45th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, vol. 1, pp. 4304–4309, 2019, doi: 10.1109/iecon.2019.8927526.

[21] M. Stieneker, B. J. Mortimer, A. Hinz, A. Müller-Hellmann, and R. W. De Doncker, “MVDC Distribution Grids for Electric Vehicle Fast-Charging Infrastructure,” *2018 Int. Power Electron. Conf. IPEC-Niigata - ECCE Asia 2018*, pp. 598–606, 2018, doi: 10.23919/IPEC.2018.8507594.



- [22] IIGE, “Balance Energético Nacional 2018,” *Dirección de Análisis y Prospectiva Eléctrica (DAPE) -MERNNR*, 2018.
- [23] “Ley Orgánica para el Fomento Productivo, Atracción de Inversiones, Generación de Empleo y Estabilidad y Equilibrio Fiscal. Resumen Informativo.,” *Supl. - Regist. Of. N° 309*, 2018.
- [24] ARCONEL, “Esquema Tarifario para la introducción de los Vehículos Eléctricos en el Ecuador,” *Resolución No. ARCONEL-038/15*, pp. 1–6, 2015.
- [25] ARCONEL, “Pliego Tarifario Para Las Empresas Eléctricas de Distribución - Servicio Público de Energía Eléctrica,” *Resolución Nro. ARCONEL – 035/19*, vol. 19, pp. 1–19, 2019.
- [26] E. Pañero, “Tipos de conectores en los vehículos eléctricos,” *www.centro-zaragoza.com*, 2019. .
- [27] “CHAdEMO Association & Protocol,” *www.chademo.com*, 2019. .
- [28] D. Ronanki, A. Kelkar, and S. S. Williamson, “Extreme fast charging technology. prospects to enhance sustainable electric transportation,” *Energies*, vol. 12, no. 19, pp. 1–17, 2019.
- [29] “Estudio del potencial de la electromovilidad solar en ecuador,” *Univ. Politécnica Sales.*, pp. 1–12, 2018.
- [30] Ilustre Municipalidad de Cuenca, “Plan de movilidad de Cuenca 2015-2025,” *Ilus. Munic. Cuenca*, 2015.
- [31] B. Irazu *et al.*, “Estudios complementarios y de Ingeniería Básica de la Red Primaria de Transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de Los Cuatro Ríos. Informe E 2.05. Diseños eléctricos,” *Ilus. Munic. Cuenca*, 2012.
- [32] BID, “Ciudad ciudad sostenible / Plan de acción,” *Bid*, 2014.
- [33] Alstom, *Turnkey integrated tramway system*, vol. I. 2016.
- [34] P. A. Medina R, D. Morales, B Tapia, D Criollo, J Romero, P Guamán, “Modelado del Tranvía Citadis-302 Implementado en la Ciudad de Cuenca Utilizando Matlab - Simulink ®,” pp. 284–293, 2016.
- [35] “Estudios complementarios y de Ingeniería Básica de la Red de Primaria de Transporte de la ciudad de Cuenca. Tranvía de Los Cuatro Ríos. Especificaciones técnicas,” *Ilus. Munic. Cuenca*, 2010.



- [36] M. R. Pelaez and J. L. Espinoza, *Energías renovables en el Ecuador: situación actual, tendencias y perspectivas*, Primera Ed. Cuenca, 2015.
- [37] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, *Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016-2035*. 2017.
- [38] C. Galarza and W. Maurat, “Evaluación del consumo específico de combustible y emisiones de gases de escape, con el uso del combustible Eco-país en un motor de combustión interna alternativo,” Universidad del Azuay, 2012.
- [39] L. Paredes and M. Pozo, “Movilidad Eléctrica y Eficiencia Energética en el Sistema de Transporte Público del Ecuador un Mecanismo para Reducir Emisiones de CO₂,” *Revista Técnica “Energía,”* vol. 16, no. 2, pp. 91–99, 2020.
- [40] J. Zhunio Morocho, “Metodología para la obtención de los indicadores que describen la operación de taxis en la ciudad de Cuenca,” Universidad del Azuay, 2017.
- [41] W. Chuquiguanga and B. Jimenez, “Análisis de viabilidad para la implementación de un vehículo eléctrico que preste el servicio de taxi en la ciudad de Cuenca,” 2018.
- [42] *Ordenanza Mejoramiento Transporte Público Urbano*. Ilustre Municipalidad de Cuenca, 2018.
- [43] Mavesa, “Hino Serie Bus,” 2016.
- [44] Volkswagen, “Especificaciones Técnicas Volkswagen D0826 260.” 2015.
- [45] L. González, “Informe de estudio de eficiencia energética autobús eléctrico (Comportamiento en ruta comercial del autobús eléctrico BYD modelo K9G),” Cuenca - Ecuador, 2019.
- [46] G. Alvarez and M. Coello, “alternativa de movilidad en la ciudad de Cuenca,” 2017.
- [47] R. R. Jurado, “Revisión crítica de datos sobre consumo de energía y emisiones en los medios públicos de transporte,” *Fund. los Ferrocarriles Españoles*, vol. I, 2012.
- [48] R. C. Dugan, “Reference Guide: The Open Distribution System Simulator (OpenDSS),” *Electr. Power Res. Institute, Inc.*, vol. I, no. November, pp. 1–177, 2018.
- [49] S. Gazebo, “Modelado y simulación de Smart Grid con OpenDSS y Matlab,” 2016.
- [50] R. Dugan, “OpenDSS Introductory Training Level 1 Introduction,” *Electr. Power Res. Institute, Inc.*, vol. I, p. 85, 2009. Available: <http://www.smartgrid.epri.com/doc/OpenDSS Level 1 Training.pdf>.



- [51] G. Guerra and J. A. Martinez-Velasco, “A review of tools, models and techniques for long-term assessment of distribution systems using OpenDSS and parallel computing,” *AIMS Energy*, vol. 6, no. 5, pp. 764–800, 2018, doi: 10.3934/ENERGY.2018.5.764.
- [52] C. Liang *et al.*, “Analysis of Access Location and Capacity of Distributed Generation Based on OpenDSS,” *2018 China Int. Conf. Electr. Distrib.*, no. 201805280000274, pp. 2264–2268, 2018.
- [53] N. Gupta, “A complete probabilistic power flow solution for transmission system,” *2012 IEEE 5th Power India Conf. PICONF 2012*, no. 2, pp. 1–6, 2012, doi: 10.1109/PowerI.2012.6479469.
- [54] W. Muevecela, “Diseño del Sistema Eléctrico en Baja Tensión para Estaciones de Carga en Autobuses Eléctricos,” Universidad de Cuenca, 2018.
- [55] ARCONEL, *Regulación Nro. ARCONEL- 053/18*. 2018, pp. 1–40.
- [56] “Guía Práctica para el Cálculo de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI),” *Com. Interdepartamental del Cambio Climático Cataluña*, pp. 0–66, 2011.