

**METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BUSES ELÉCTRICOS DUALES  
CON BATERÍAS LITIO-FERROFOSFATO EN LA RUTA CIRCULAR SUR 302 DE  
MEDELLÍN, COLOMBIA**

**MARÍA ELISA BRIÑÓN ZAPATA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA**

**MEDELLÍN**

**2018**

METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BUSES ELÉCTRICOS DUALES CON  
BATERÍAS LITIO-FERROFOSFATO EN LA RUTA CIRCULAR SUR 302 DE MEDELLÍN,  
COLOMBIA

MARÍA ELISA BRIÑÓN ZAPATA

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería

Director

MAURICIO RESTREPO RESTREPO

PhD en Ingeniería Eléctrica y Computación

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

MEDELLÍN

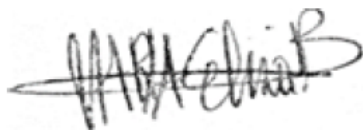
2018

**04 de febrero de 2019**

**María Elisa Briñón,**

“Declaro que esta tesis (o trabajo de grado) no ha sido presentada para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad” Art 82 Régimen Discente de Formación Avanzada.

Firma

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'M. Elisa Briñón', written over a light blue rectangular stamp.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por ser mi guía, fuerza, apoyo, tranquilidad y alegría.

A mi familia, por su cariño, dedicación y apoyo en todos los momentos. En especial a mi hermana Ana Catalina por su ayuda.

A mi director de tesis Mauricio Restrepo, quien es un gran conocedor del tema, por su paciencia, consejos, explicaciones y ayuda. Además, por todo el tiempo que me dedicó para poder guiar este trabajo de grado.

A la Universidad Pontificia Bolivariana y sus excelentes docentes, en especial a Andrés Emiro Díez, por sus grandes explicaciones y sus ideas.

A mi amigo Julián Rendón, quien fue un gran maestro y guía. Gracias por ayudarnos a plasmar las ideas y por el tiempo compartido.

A mi amiga Paula Andrea Restrepo por insistirme en iniciar este camino y la compañía en todos estos años.

A Luis Felipe Tobón por acompañarme en todos mis caminos.

A Daniel Arroyave por ayudarnos y explicarnos.

A todas las personas que de alguna manera hicieron parte del proceso porque sin todo ese apoyo no hubiera logrado esta hazaña.

## CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABLAS.....	viii
GLOSARIO.....	x
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
1 MARCO TEÓRICO.....	6
1.1 TECNOLOGÍAS URBANAS DE AUTOBUSES ELÉCTRICOS.....	6
1.2 BUSES ELÉCTRICOS.....	7
1.2.1 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL TIPO DE ALIMENTACIÓN.....	7
1.2.2 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL TIPO DE CARROCERÍA.....	10
1.2.3 VENTAJAS DE LOS BUSES ELÉCTRICOS.....	11
1.2.4 FRENADO REGENERATIVO.....	11
1.3 BATERÍAS PARA BUSES ELÉCTRICOS.....	12
1.4 SUBESTACIONES DE TRACCIÓN.....	16
1.5 ESTRATEGIAS PARA LA RECARGA DE BUSES ELÉCTRICOS.....	17
2 METODOLOGÍA.....	18
2.1 METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL ESTUDIO.....	18
2.2 SOFTWARE.....	19
2.2.1 OPENTRACK.....	20
2.2.2 MATLAB.....	21
2.3 CÁLCULO DE ESFUERZOS DE TRACCIÓN.....	21
2.3.1 RESISTENCIA AL AVANCE.....	22
2.3.2 RESISTENCIA POR CURVATURA.....	22

2.3.3	RESISTENCIA POR PENDIENTE .....	23
2.3.4	CURVA DE TRACCIÓN .....	23
3	ANÁLISIS TÉCNICO .....	26
3.1	CARACTERÍSTICAS DE LA RUTA CIRCULAR SUR 302 .....	26
3.2	CARACTERÍSTICAS DE LOS BUSES .....	29
3.2.1	DATOS TÉCNICOS.....	29
3.3	ANÁLISIS ZONAS DE ELECTRIFICACIÓN.....	30
3.4	CÁLCULOS CONSUMOS ENERGÉTICOS.....	35
3.4.1	CÁLCULOS DE CONSUMOS ENERGÉTICOS PARA UN BUS .....	35
3.4.2	CÁLCULOS DE CONSUMOS ENERGÉTICOS LA FLOTA COMPLETA....	37
3.5	DIMENSIONAMIENTO DE LAS SUBESTACIONES.....	41
3.6	FRENADO REGENERATIVO LOGRADO .....	43
3.7	SELECCIÓN DE LAS BATERÍAS.....	44
3.8	ESTADO DE CARGA DE LAS BATERÍAS .....	45
3.9	SELECCIÓN DE CARGADORES EN PATIO .....	47
4	ANÁLISIS DE COSTOS.....	49
	CONCLUSIONES.....	59
	RECOMENDACIONES.....	61
	BIBLIOGRAFÍA.....	62

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Contaminación a nivel mundial y en Medellín por sectores [10], [11]. .....	1
Figura 2. Esquema de trolebús [24]. .....	8
Figura 3. Esquema general de un bus eléctrico con batería a bordo [30]. .....	9
Figura 4. Bus articulado [34]. .....	10
Figura 5. Bus padrón [34]. .....	10
Figura 6. Relación entre las características para las baterías de Litio Ferrofosfato [41]. ..	14
Figura 7. Capacidad de pasajeros para un bus de 12 m, en función del peso de la batería [3]. .....	15
Figura 8. Diagrama unifilar general de una subestación de tracción [45]. .....	16
Figura 9. Metodología para el desarrollo del estudio. ....	19
Figura 10. Componentes de la herramienta de simulación [48]. .....	20
Figura 11. Descomposición de la masa del tren en una componente normal y una componente paralela a la vía [51]. .....	23
Figura 12. Curva de tracción para motor diésel y motor eléctrico [52]. .....	24
Figura 13. Recorrido Circular Sur Izquierda 302 [54]. .....	26
Figura 14. Ruta Circular Sur 302 izquierda con paradas y segmentos [55]. .....	28
Figura 15. Curva de tracción del bus padrón. ....	30
Figura 16. Vía de trolebús pasando por glorieta en Comunidad Valenciana, España [57]. .....	31
Figura 17. Glorieta de Don Quijote en la ruta Circular Sur 302 [58]. .....	31
Figura 18. Vía de trolebús pasando por puente en Gdynia, Polonia [59]. .....	32
Figura 19. Puente de la Calle 4 sur en la ruta Circular Sur 302 [60]. .....	32
Figura 20. Esquema de circuito de potencia para trolebús con batería de respaldo [61]. ..	35
Figura 21. Potencia demandada de un bus por recorrido, consumo energético de un recorrido, posición del bus y consumo energético por segmento en un recorrido completo. ....	36

Figura 22. Posición de los buses 1 y 63 en el transcurso del día. ....	37
Figura 23. Potencia instantánea de la flota en un día completo. ....	38
Figura 24. Energía total consumida por la flota en un día completo de operación.....	39
Figura 25. Potencia por segmento. ....	39
Figura 26. Consumo energético por segmento para todos los casos. ....	40
Figura 27. Curva de duración por segmentos con carga de baterías en las catenarias....	41
Figura 28. Curva de duración por segmentos sin carga de baterías en las catenarias....	42
Figura 29. Energía recuperada con el frenado regenerativo para un bus.....	43
Figura 30. Estado de carga de las baterías para los 3 casos de electrificación.....	46
Figura 31. Estado de carga de las baterías con degradación.....	47
Figura 32. Tiempo de carga de las baterías en patio, al final del recorrido.....	48
Figura 33. Comparativo de costos en los tres casos de análisis. ....	55
Figura 34. Comparación entre VAE para cada caso de estudio. ....	56
Figura 35. Comparación VAE para ambas tecnologías con sensibilidad del precio de catenaria.....	58



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparación vehículos ICE, BEV y HEV [12] .....	2
Tabla 2. Matriz morfológica de tecnologías disponibles para buses eléctricos [3]. .....	6
Tabla 3. Características de baterías de LiFePO <sub>4</sub> , [3], [37], [39]. .....	13
Tabla 4. Información general ruta Circular Sur 302. ....	27
Tabla 5. Rangos horarios de despachos.....	27
Tabla 6. Cantidad de despachos e intervalo de tiempo de los despachos. ....	28
Tabla 7. Datos técnicos trolebús Vossloh Kiepe. ....	29
Tabla 8. Longitudes totales electrificación y batería. ....	33
Tabla 9. Casos de estudio y porcentaje de electrificación. ....	34
Tabla 10. Datos de electrificación ruta Circular Sur 302.....	34
Tabla 11. Clasificación de subestaciones según norma EN 50328 de 2003. ....	42
Tabla 12. Selección de batería para casos realizados. ....	44
Tabla 13. Selección de batería. ....	45
Tabla 14. Casos de análisis de infraestructura.....	50
Tabla 15. Resumen de los casos de análisis para bus eléctrico dual.....	50
Tabla 16. Costos de inversión [3], [66], [67]. ....	51
Tabla 17. Costos Operativos [66].....	51
Tabla 18. Costos energéticos mensuales [68] .....	52
Tabla 19. Costos para el caso 1 Bus a batería.....	52
Tabla 20. Costos para el caso 2 Bus a batería.....	52
Tabla 21. Costos para el caso 3 Bus a batería.....	53
Tabla 22. Costos para el caso 1 Bus dual.....	53
Tabla 23. Costos para el caso 2 Bus dual.....	53
Tabla 24. Costos para el caso 3 Bus dual.....	53

Tabla 25. Comparación Valor Anual Equivalente ..... 56

## GLOSARIO

**Batería:** Dispositivo electroquímico para el almacenamiento de energía [1].

**Capacidad de la batería:** Es la cantidad medida de amperios hora (Ah) que puede suministrar o aceptar una batería [2].

**Carga dinámica:** También es conocida como carga en movimiento. Es un esquema de carga en el cual las baterías de los buses se cargan mediante la energía suministrada por un cable aéreo, al cual se conecta el vehículo mediante un colector de corriente. De esta forma, la energía para los tramos sin catenarias se puede suministrar por el almacenamiento de energía [3].

**Carga de oportunidad:** También es conocida como carga rápida. Es un esquema de carga en el cual las baterías se cargan durante cortos periodos de tiempo mientras el bus se encuentra en una de las paradas de la ruta. Utilizan sistemas de carga automáticos como lo son los pantógrafos o sistemas de inducción. Se requieren grandes potencias de recarga debido al límite de tiempo de recarga [3].

**Cargador eléctrico:** Elemento usado para suministrar la energía requerida por una batería [4].

**Catenaria:** Conjunto de conductores suspendidos por medio de postes a una altura adecuada con la cual se realiza la alimentación de vehículos como trenes ligeros, tranvías y trolebuses [2].

**Celda:** El menor elemento que forma una batería, pueden ser asociadas en serie o en paralelo con el objetivo de conseguir los valores de corriente o de tensión deseados [5].

**Densidad gravimétrica:** Relación entre la energía disponible en una batería y su volumen o masa [3].

**Estado de carga (SoC):** Parámetro para describir cuánta energía tiene la batería, o cuánto puede durar la carga [6].

**Flota:** Conjunto de vehículos destinados a cumplir un objetivo dentro de una empresa transportadora [7].

**Frenado regenerativo:** Mecanismo de frenado o desaceleración, que permite producir energía eléctrica por medio del generador acoplado a la tracción. Esta energía se envía a un almacenador, que puede estar compuesto por baterías o condensadores electrolíticos [2].

**Material particulado:** Conjunto de partículas líquidas y sólidas procedentes de sustancias orgánicas e inorgánicas, que se encuentran suspendidas en el aire y contribuyen a la contaminación atmosférica [8].

**Tasa de cambio representativa del mercado (TRM):** Cantidad de pesos colombianos por un dólar de los Estados Unidos de América.

**Valor anual equivalente (VAE):** Rendimiento anual uniforme, generador por la inversión de un proyecto durante un periodo definido.

**Vida útil:** Tiempo en que un elemento es capaz de mantener sus características por encima de unos límites mínimos predeterminados. Particularmente para las baterías, es el número de veces que la batería puede ser recargada, para recuperar su capacidad completa después del uso [5].

## **SIGLAS Y ABREVIATURAS**

BEV: Vehículo eléctrico impulsado únicamente por baterías.

CAOM: Costos de administración, operación y mantenimiento.

COP: Signo representativo del peso colombiano.

ESS Sistema de almacenamiento de energía.

HEV: Vehículo eléctrico híbrido.

ICE: Vehículo de combustión interna.

LFP: Litio ferrofosfato.

LTO: Litio titanato.

NMC: Óxido de manganeso y cobalto de litio.

PBV: Peso bruto vehicular.

SoC: Estado de carga.

TRM: Tasa de cambio representativa del mercado.

VAE: Valor anual equivalente.

VAN: Valor anual neto.

VRLA: Batería de plomo ácido.

## RESUMEN

En este documento se presenta un modelo de simulación para calcular el consumo energético de la ruta de buses Circular Sur 302 de Medellín, la cual opera actualmente con vehículos alimentados con combustibles derivados del petróleo. Este modelo se utiliza para analizar la factibilidad de reemplazar dichos vehículos por trolebuses con respaldo a batería de litio ferrofosfato. Para ello, se plantean tramos electrificados con catenarias para la alimentación de los buses a través del trole y otros segmentos donde el bus opera con la batería.

Inicialmente, se analizó la ruta Circular Sur 302 utilizando el aplicativo Google Earth, y se obtuvieron los datos de entrada necesarios para el cálculo de consumo energético de un bus en uno de sus recorridos con ayuda del software Open Track. Posteriormente, se efectuó un procesamiento de datos en Matlab, considerando la información real del despacho actual de la ruta, con el fin de calcular los consumos energéticos y potencias totales de la flota. El cálculo de consumos energéticos permite dimensionar las características de las baterías e infraestructura (subestaciones de tracción y catenarias) necesarias para la ruta, y obtener los datos de entrada para elaborar un análisis de los costos de inversión y operación. Adicionalmente, dentro del análisis de consumos, se incluyó la implementación del frenado regenerativo, lo cual hace aún más llamativo el cambio a esta tecnología. Finalmente, se dimensionaron las baterías de respaldo para los buses de la flota, considerando su estado de carga en varios escenarios operativos, y se calculó la infraestructura de recarga en patios.

En el estudio se analizaron tres escenarios variando el porcentaje de electrificación de la ruta Circular Sur 302, y se calculó el estado de carga de las baterías en los diferentes casos. Según los resultados obtenidos, el caso más factible de implementación fue el que contaba con tres segmentos electrificados, pues el estado de carga se mantuvo dentro de los rangos adecuados y los costos iniciales fueron aceptables.

Con este estudio se pudo concluir que la implementación de sistemas de transporte público con buses duales es viable por sus múltiples beneficios, entre los que se incluyen las mejoras en el ámbito ambiental, el aprovechamiento de la energía hidroeléctrica abundante en el país, y los ahorros energéticos por la implementación de motores eléctricos más eficientes.

**Palabras clave:** Bus eléctrico dual, batería de litio ferrofosfato, consumo energético, estado de carga, frenado regenerativo, carga dinámica.

## ABSTRACT

This document introduces a simulation model to calculate the energy consumption of the Circular Sur 302 bus route in Medellín, which currently operates with vehicles fed by petroleum-based fuels. This model was created to analyze the feasibility of replacing these vehicles with trolleybuses with lithium iron phosphate battery backup. To do so, it would be necessary to install catenary sections with the purpose of powering the buses through the trolley in some segments of the route and use the battery in the other sections.

Initially, the Circular Sur 302 route was analyzed using Google Earth, and Open Track software was used to obtain the necessary input data to calculate the energy consumption of a bus in one of its routes. Subsequently, the data was processed in Matlab, taking into consideration the information of the current route dispatch, to calculate the energy consumption and total power of the fleet. The energy consumption calculation allowed to size the batteries and the infrastructure (traction substations and catenary) that would be necessary for the route. It also made possible to obtain input data for analyzing the investment and operation costs. Additionally, the implementation of regenerative braking was part of the consumption analysis, which is a feature that makes the change to this technology very appealing. Finally, after sizing the bus back-up batteries, their SoC were computed for different operating scenarios, and the recharge infrastructure in parking lots was calculated.

This study analyzed three scenarios, varying the percentage of electrification of the Circular Sur 302 route, in order to determine battery SoC in those cases. According to these results, the case in which the route had three electrified segments was the most feasible for implementation, since the SoC remained within the appropriate ranges and the initial costs were adequate.

After this study, we conclude that the implementation of dual buses in public transport systems is viable, due to the multiple benefits they provide, such as improvements in the environment, the use of hydropower, which is abundant in the country, and the energy savings obtained by the implementation of more efficient electric motors.

**Keywords:** Dual electric bus, lithium iron phosphate battery, energy consumption, state of charge, regenerative braking, dynamic charge.

## INTRODUCCIÓN

El rápido deterioro de la calidad del aire en las ciudades densamente pobladas, debido principalmente al aumento del material particulado en suspensión, ha generado una creciente preocupación a nivel mundial. La forma más usada para medir la contaminación es el indicador PM 2,5, que indica la cantidad de microgramos de partículas en suspensión de tamaños menores a 2,5 micrones de diámetro, por cada metro cúbico de aire. Según estudios estadísticos, China es el país más contaminación atmosférica, superando los 500 microgramos por cada metro cúbico. La OMS (Organización Mundial de la Salud) advierte que niveles mayores a 35 microgramos son altamente nocivos [9]. Otros países con altos niveles de contaminación son Arabia Saudí (108 microgramos), Catar (103 microgramos) y Egipto (93 microgramos). Estos estudios también revelan que el sector transporte, tanto público como privado, aporta un 14% de emisiones de gases de efecto invernadero [10], como puede apreciarse en la Figura 1. Sin embargo, el caso de Medellín es muy particular, debido a que cerca del 86% de la contaminación que se presenta en la ciudad tiene como causa el transporte terrestre, tanto público como privado [11]. En la Unión Europea, por su parte, el transporte es el responsable del 25% de la contaminación y la emisión de gases de efecto invernadero, lo que se explica en que 90% del transporte funciona con combustibles derivados del petróleo [3].



Figura 1. Contaminación a nivel mundial y en Medellín por sectores [10], [11].

Los autores en [12] cuantificaron las emisiones producidas durante el ciclo de vida completo (fabricación, transporte, uso y desecho) de tres diferentes tipos de vehículos: los vehículos a gasolina (ICE), los vehículos eléctricos impulsados únicamente por baterías (BEV) y los vehículos eléctricos híbridos (HEV). Adicionalmente, analizaron parámetros como la energía requerida y la masa equivalente de dióxido de carbono producido. En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos en este estudio.



Tabla 1. Comparación vehículos ICE, BEV y HEV [12].

Tipo de vehículo	Energía [MJ/milla]	Emisiones [kg CO <sub>2</sub> eq/milla]
ICE	4,77	0,35
HEV	3,14	0,23
BEV	2,82	0,18

Como se puede apreciar, un ICE consumen 69% más de energía que un BEV y produce el doble de emisiones. Además, este tipo de vehículos son responsables de emitir sustancias nocivas, como el monóxido de carbono por la combustión incompleta, los hidrocarburos del combustible no quemado, y los óxidos de nitrógeno como resultado de las altas temperaturas de combustión [3]. Estas cifras iniciales, abren la puerta para que la opción de transporte basada en vehículos eléctricos adquiera relevancia en varios proyectos de investigación.

Como respuesta a la contaminación ambiental ocasionada por el sector transporte, muchas grandes ciudades han incluido iniciativas para disminuir esta problemática. Por ejemplo, Londres implementó la normativa conocida como *Low Emission Zone*, donde se establecen estándares de emisión estrictos a los vehículos diésel [13]. En Ciudad de México se adoptó el programa “Hoy no circula”, con el cual se prohíbe la circulación de ciertos vehículos según el último número de su matrícula. Sin embargo, estas medidas se están quedando cortas para las necesidades actuales, si se considera que para el 2050, el crecimiento de la población mundial provocará un incremento de la demanda de vehículos de 700 a 2500 millones anuales (es decir, un aumento del 257% con respecto a las cifras de 2004) [14]. Si dicha demanda es suplida con vehículos de combustión interna (ICE), se producirán muchas más toneladas de CO<sub>2</sub> y material particulado, agravando la situación previamente planteada [12].

Como parte importante de los sistemas de transporte público, los autobuses diésel son un gran problema en las áreas urbanas por su uso intensivo y su alto impacto contaminante. A pesar de estas desventajas, siguen siendo preferidos por tratarse de una opción que requiere de una inversión inicial inferior a un sistema de transporte eléctrico de características similares, como los trolebuses y tranvías. Sin embargo, para ganar mayor aceptación y disminuir sus precios, el uso de autobuses urbanos eléctricos se ha venido promoviendo en varios países europeos, en China, Estados Unidos y Japón, a partir de políticas de incentivo a tecnologías eléctricas e híbridas a corto y mediano plazo, y la producción de buses eléctricos a gran escala [15].

En la inmensa mayoría de las ciudades de Colombia se siguen desarrollando sistemas de transporte público masivo basados en buses que utilizan derivados del petróleo como alimentación [16], por lo que el país aún se encuentra muy atrasado en la implementación de tecnologías limpias para el transporte, desaprovechando la gran ventaja hidroeléctrica del país y ampliando la incertidumbre en el suministro de combustibles a largo plazo.

Medellín es la única ciudad del país que cuenta con un sistema masivo de transporte impulsado por energía eléctrica, consistente en dos líneas de tren que recorren la ciudad de norte a sur y del centro al oriente. Sin embargo, por el tamaño de la ciudad, el metro no logra cubrir toda su extensión, por lo que se requieren buses que complementen su operación y recorran el resto de la ciudad.

Así las cosas, es razonable plantear que dichos buses contribuyan con el mejoramiento de la situación ambiental de la ciudad, migrando a tecnologías limpias como los buses eléctricos o trolebuses. En este punto, cabe resaltar que la diferencia entre estos dos tipos de vehículos eléctricos es el sistema de alimentación. Así, el bus eléctrico se alimenta a través de baterías que pueden ser cargadas en las redes eléctricas, puntos de carga específicos o ser baterías intercambiables, es decir, de fácil reemplazo por unas previamente cargadas [17]. Por otra parte, los trolebuses cuentan con un sistema de captación conocido como trole, el cual se alimenta permanentemente desde unas líneas de corriente directa [2].

La necesidad de mejorar la calidad del aire en zonas urbanas ha motivado gran cantidad de estudios que proponen incentivos y esquemas operativos para el reemplazo de flotas de buses por tecnologías eléctricas. Sin embargo, reemplazar flotas de buses completas implica múltiples desafíos, entre los cuales vale la pena mencionar diversas opciones de vehículos eléctricos, tecnologías de carga, la presencia de catenarias y la gran cantidad de factores a considerar para la implementación de este tipo de solución. Lo anterior, toda vez que las variables implican diferentes ventajas y desventajas según la tecnología y los costos de inversión inicial y de operación [3].

Diferentes autores han investigado sobre el uso de buses eléctricos en sistemas de transporte público. En [3], se presenta un estudio para sistemas de autobuses eléctricos urbanos y una evaluación de factibilidad técnica y costo total. Por su parte, en [18], se desarrolla un modelo para determinar el consumo de energía y calcular los tamaños de baterías propias para una flota, basándose en la posibilidad de carga por oportunidad, aprovechando la parada de los buses para recargar sus baterías. Adicionalmente, la referencia [19] expone un estudio sobre el dimensionamiento sistemas de baterías para rutas específicas, en función de su demanda de energía, limitándose únicamente al dimensionamiento de las baterías, más no de la infraestructura para su carga.

En el artículo [20] se menciona la inconveniencia del suministro de energía a través de líneas aéreas durante fallas en el suministro de energía o cambios en la ruta por algún problema vial. Además, se comparan motores de combustión interna auxiliar, supercondensadores y baterías electroquímicas como fuente de respaldo. Cabe resaltar que este estudio se planteó con base en el uso de baterías de NiCd.

En [21] se expone una metodología para evaluar la efectividad de la electrificación de rutas de buses en términos de mitigación del calentamiento global. También se formulan críticas a los buses con batería, debido su gran peso y su elevado costo.

Los autores en [22] analizan la relación entre los tipos de ruta y la energía que consume un autobús en recorrerlas, considerando el frenado regenerativo propio de este tipo de tecnología. Adicionalmente, varios autores han efectuado evaluaciones económicas genéricas sobre autobuses eléctricos. Por ejemplo, en [23], se presenta un método de pronóstico financiero para sistemas de transporte urbano. En [24], se lleva a cabo un análisis financiero teniendo en cuenta costos de los buses, datos de operación, vida útil, consumos energéticos, tasas de interés, costos de mantenimiento, de infraestructura y de operación.

Otro aspecto de interés, dentro el estudio de vehículos eléctricos es el análisis de las estrategias de recarga disponibles. Entre las más comunes se encuentran la carga de oportunidad, que normalmente es una carga rápida, y por lo tanto implica que las baterías tengan la capacidad de cargarse con altas potencias en cortos períodos de tiempo, y la carga en movimiento, con la cual el bus puede continuar con su operación normal y recargar su batería con las catenarias. En [25] se analiza la eficiencia, viabilidad y beneficios de dos esquemas de carga para buses de transporte público mediante la transferencia inalámbrica de energía y el uso de sistemas de catenarias. Por otro lado, en [26] se estudia la posible aplicación de carga en movimiento para una línea de trolebuses existente en Gdynia (Polonia). Adicionalmente, se han realizado estudios económicos sobre el tema, como se expone en [27], donde los autores revisan cuantitativamente los beneficios de la carga dinámica, desarrollando un modelo económico y matemático de optimización.

Muchos autores se han dedicado a la investigación sobre la electrificación de sistemas de transporte público con buses, pues es un tema de interés general por los problemas de contaminación atmosférica que se presentan a nivel mundial. Aunque en el ámbito colombiano se han desarrollado algunos estudios de este tipo, es necesario realizar más estudios que incluyan otras configuraciones de buses, e implementar los resultados de los estudios efectuados hasta ahora. En particular, en Colombia no se han ejecutado estudios sobre la implementación de sistemas de buses eléctricos duales, los cuales presentan ventajas sobre los trolebuses convencionales. Este tipo de buses se caracterizan por el suministro de energía a través de dos fuentes: la línea aérea de contacto o catenaria, y la batería de respaldo, las cuales son recargadas en movimiento, por medio de la catenaria. Las baterías han evolucionado enormemente en los últimos años, exhibiendo muchas mejoras en términos de densidad gravimétrica y costos, por lo que se hace relevante plantear una metodología para el análisis de la electrificación de rutas de buses con tecnología dual. La mayor ventaja de los buses duales es la disminución de la infraestructura de alimentación aérea, y la operación autónoma del vehículo en segmentos prologados de la ruta.

Por este motivo, a lo largo de estas páginas, se desarrolla un estudio sobre la implementación de buses eléctricos duales, utilizando baterías de respaldo de litio ferrofosfato, en un esquema de recarga dinámica, en la ruta Circular Sur 302 de la ciudad de Medellín. Esta ruta recorre gran parte de las zona oriental y occidental de la ciudad, conectando importantes áreas residenciales, comerciales y educativas, y siendo considerada una de las rutas más extensas, por lo que resulta un excelente caso de análisis para la electrificación mediante buses duales.

El objetivo principal de este trabajo de grado es desarrollar un método para la selección de buses eléctricos duales con tecnología litio ferrofosfato en el proyecto de electrificación de la ruta de bus Circular Sur 302, incluyendo un análisis de los costos de inversión, de operación, a partir de las especificaciones técnicas de operación de la ruta. Para alcanzar este objetivo, se analizan los consumos energéticos de la flota, con el fin de dimensionar las baterías adecuadas y la infraestructura de carga y alimentación de los vehículos. Adicionalmente, se establecen los costos de inversión y operación para dar indicios sobre la viabilidad de reemplazar la flota existente, la cual es alimentada con combustibles derivados del petróleo. Si bien se reconoce el alcance limitado de este estudio, la metodología que se propone es un buen ejemplo para implementar mejoras y proveer información relevante para las empresas de transporte público, generando conciencia sobre la necesidad y pertinencia de la electrificación de rutas mediante buses duales en esquemas de carga dinámica.

Es importante mencionar que este estudio se llevó a cabo en forma paralela con la estudiante de Maestría Paula Andrea Restrepo Uribe, quien desarrolló un estudio de la misma ruta, basando su análisis en buses eléctricos con batería de litio titanato bajo un esquema de carga de oportunidad [28]. Esta forma de proceder permite efectuar comparaciones entre ambos casos de autobuses eléctricos, lo que se considera útil y pertinente para un análisis más global.

A continuación se expone la estructura del presente documento:

En el primer capítulo se incluye una vigilancia tecnológica sobre buses eléctricos y baterías, en particular la tecnología de litio ferrofosfato. En el segundo capítulo se explica la metodología usada para el desarrollo del trabajo de grado, donde se describe el software utilizado, los datos de la ruta y las características de los buses seleccionados para la simulación. Posteriormente, en el tercer capítulo, se presentan los resultados obtenidos en el estudio, incluyendo los consumos energéticos para cada bus y para la flota completa, obtenidos mediante el software Open Track y Matlab. El cuarto capítulo expone la evaluación de costos, considerando la adquisición de los nuevos buses, el tipo de batería, el peso de la batería, la infraestructura de las catenarias, entre otros factores, realizando una comparación entre buses de batería y trolebuses. Por último, se presentan los resultados, conclusiones y recomendaciones para próximos trabajos.

# 1 MARCO TEÓRICO

Para iniciar este trabajo de grado, se presenta una breve descripción de las tecnologías de buses eléctricos a batería y trolebuses, mencionando sus ventajas y principales características. Adicionalmente, se analizan las propiedades de las baterías de litio ferrofosfato, las cuales son parámetros fundamentales para el desarrollo del proyecto.

## 1.1 TECNOLOGÍAS URBANAS DE AUTOBUSES ELÉCTRICOS

El diseño de un sistema de bus eléctrico es realmente complejo debido a las múltiples opciones de soluciones respecto a las fuentes de energía, la estrategia de recarga, la fuente de energía a bordo, y el tipo de motor, entre otros. La Tabla 2 presenta todas las posibles combinaciones que se tienen para las soluciones de movilidad con buses eléctricos, dentro de los cuales se resalta la combinación de opciones tecnológicas seleccionada para este estudio.

FUNCIÓN	OPCIONES					
Fuente energética	Red				Almacenamiento local	
	Baja tensión	Media tensión	Alta tensión	Riel eléctrico	Batería estacionaria	Tanque de hidrógeno H <sub>2</sub>
Estrategia de recarga	De oportunidad	En movimiento	En depósito			
Interfaz de recarga	Conexión manual	Conexión por pantógrafo	Inducción	Colector de corriente de trolebús	Intercambio de batería	
Fuente de energía a bordo	Baterías			Condensador	Tanque de H <sub>2</sub> Celda de combustible	Ninguna
	NMC	LFP	LTO			
Tipo de motor	Sincrónico	Asincrónico				
Topología de transmisión	Motor central	Motor a eje de rueda				
Tipo de carrocería	12 m padrón	18 m articulado	24m bi-articulado	Doble piso		
Enfriamiento	Con aire acondicionado	Sin aire acondicionado				
Calefacción	Calentamiento por resistencia eléctrica	Bomba de calor eléctrica	Combustible para calefacción	Sin calefacción		

Tabla 2. Matriz morfológica de tecnologías disponibles para buses eléctricos [3].

Para este análisis se definieron los siguientes parámetros:

- Buses padrón de 12 metros, con motor central asincrónico.
- Baterías de Litio ferrofosfato como fuente de respaldo.
- Interfaz de carga y alimentación con colector de trolebús y de forma manual en la carga en patios.
- Carga en movimiento, conectado a las catenarias.
- Las subestaciones de tracción tendrán como fuente energética en media tensión.

## **1.2 BUSES ELÉCTRICOS**

Los autobuses son vehículos pesados que se usan principalmente para el transporte público urbano y que suelen caracterizarse por tener rutas cortas con una serie de paradas frecuentes. Los autobuses eléctricos son aquellos que cumplen las mismas funciones, pero poseen un motor completamente eléctrico que los impulsa, dando así beneficios con respecto a la contaminación atmosférica y sonora [29]. Este tipo de vehículos se puede categorizar así:

- Trolebuses.
- Buses híbridos.
- Buses con batería a bordo.
- Buses duales.

### **1.2.1 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL TIPO DE ALIMENTACIÓN**

El análisis del presente documento se centra en la categoría de buses eléctricos con dos alternativas para su alimentación, con redes eléctricas o con baterías. Por tal motivo se presenta un detalle más profundo de estos dos tipos de vehículos.

#### **1.2.1.1 Trolebuses**

En la Figura 2 se presenta el esquema básico de un trolebús. De esta imagen se resalta la catenaria, que es el medio por el cual, normalmente, se alimenta el trolebús. Las catenarias están suspendidas a una altura mayor que la de los trolebuses, equipados de troles, los cuales tienen un contacto permanente con el cable y se deslizan por éste en el recorrido del autobús. El sistema de trole cuenta con dos cables paralelos, uno a la tensión nominal del sistema y otro para el retorno del circuito [2].

Para la instalación de las catenarias se requiere de una infraestructura de tamaño considerable que genera un gran impacto visual. Por este motivo, el uso de éstas siempre ha generado polémica, en vista de que algunos afirman que no son agradables a simple vista. Lo anterior no deja de ser una opinión subjetiva, por lo que no debería ser considerada

como un factor determinante para la implementación de este sistema. Por tal motivo, es necesario realizar cálculos y análisis precisos que enfrenten los beneficios y desventajas de este sistema de tracción y arrojen elementos objetivos de juicio para determinar la conveniencia y pertinencia de introducir este modelo en el transporte público, buscando el mayor beneficio para las comunidades. Adicionalmente, y ante estas observaciones estéticas, en la actualidad se han buscado diseños nuevos para las catenarias, los cuales sean arquitectónicamente acordes con los paisajes urbanos de las ciudades, con el fin de mitigar la aversión que se tiene por los cables aéreos.



Figura 2. Esquema de trolebús [24].

Los trolebuses se pueden clasificar en tres generaciones, en función de la complejidad de los sistemas electrónicos, los cuales son cada vez más sofisticados, y de las características de sus sistemas electromecánicos, cuya tendencia es a simplificarse [24].

Una ventaja adicional de los trolebuses es su posibilidad de intercambio energético con la red eléctrica, es decir, la conexión del bus a la catenaria no sólo sirve para alimentar el vehículo y cargar la batería de respaldo, sino que también puede entregar potencia a la red con el frenado regenerativo.

#### 1.2.1.2 Buses con batería a bordo

Los autobuses eléctricos con batería a bordo son aquellos que alimentan al motor eléctrico por medio de baterías que pueden ser cargadas por la red eléctrica convencional en puntos de carga específicos, o pueden ser reemplazadas por un nuevo conjunto de baterías completamente cargadas.

Los buses con batería a bordo también suelen incorporar otras tecnologías que reducen el consumo de energía, por ejemplo, el frenado regenerativo. Eso permite que el motor

eléctrico recupere parte de la energía consumida durante el frenado. Esto mejora la eficiencia energética y reduce el desgaste de los frenos [30].

A diferencia del trolebús, los buses eléctricos con batería a bordo no requieren una conexión a líneas aéreas durante todo el recorrido del bus, pero requieren puntos de carga. Estos últimos pueden funcionar bajo esquemas de carga lenta, en los cuales se alcanza un estado de carga completo tras varias horas de conexión, o en esquemas de carga rápida, que permiten inyectar altas cantidades de energía a la batería en períodos cortos de tiempo. Los cargadores rápidos se instalan en las paradas de los buses, con lo cual se pueden dimensionar baterías de menores proporciones, en comparación con las baterías de carga lenta, las cuales se cargan normalmente en la noche. Contar con baterías de menor tamaño influye positivamente en menores pesos del vehículo, mayor capacidad de pasajeros y una menor inversión en los costos de las baterías. Sin embargo, se debe planear con anticipación la ruta del bus y equipar suficientes puntos de carga teniendo en cuenta que un número excesivo de puntos de carga tiene una influencia negativa en el costo inicial del proyecto [31]. En la Figura 3 se presenta un esquema de bus a batería.

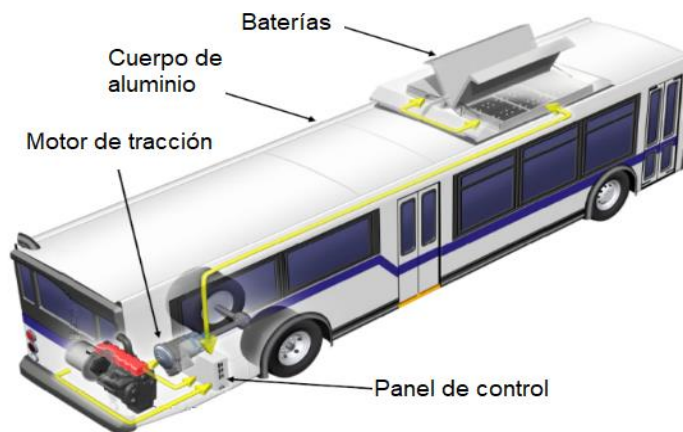


Figura 3. Esquema general de un bus eléctrico con batería a bordo [30].

### 1.2.1.3 Buses duales

Los buses híbridos son aquellos que disponen de dos fuentes de energía para la tracción que funcionan conjuntamente. Además, debe constar de uno o varios motores, un generador y un medio de almacenamiento de energía. Si una de las fuentes de energía es eléctrica, se denomina híbrido [32].

A diferencia de los buses híbridos, los buses duales o buses con fuente dual son aquellos netamente eléctricos, pero que cuentan con dos fuentes de alimentación, como lo son las catenarias y las baterías de respaldo. Este es el tipo de bus seleccionado para el desarrollo de este estudio, pues presenta múltiples ventajas respecto a otras tecnologías, entre las que se resaltan las siguientes: ampliación de rango de operación, reducción de limitaciones para la instalación de la red de alimentación, y mejora en la flexibilidad de aplicación [33].



## 1.2.2 CLASIFICACIÓN SEGÚN EL TIPO DE CARROCERÍA

Por otro lado, también se parametrizan este tipo de vehículos por sus tamaños y dimensiones en buses articulados y buses padrones, los cuales se presentan en las Figuras 4 y 5.

### 1.2.2.1 Buses articulados

Son aquellos que cuentan con dos secciones o módulos unidos por un espacio denominado acordeón, que permite una fácil movilidad entre curvas, con una capacidad para 80 a 160 pasajeros aproximadamente. Normalmente cuenta con 20 metros de longitud [34].

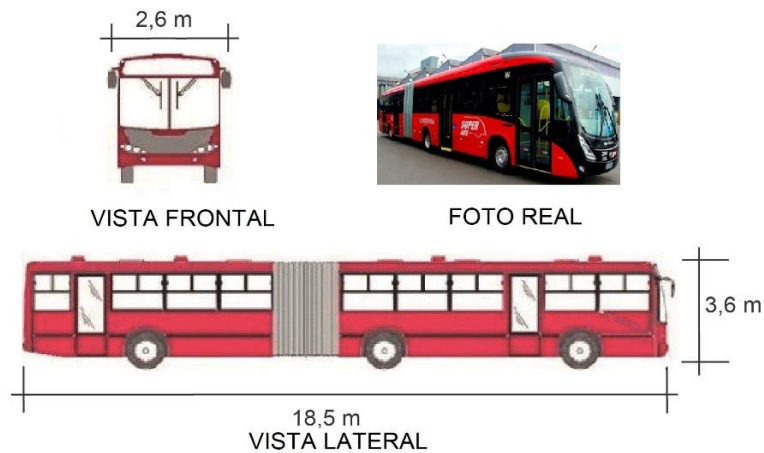


Figura 4. Bus articulado [34].

### 1.2.2.2 Buses padrones

Son autobuses que cuentan con una longitud de aproximadamente 12 metros y una sola estructura compacta, es decir, no posee secciones ni particiones de ningún tipo. Posee una capacidad de transporte de alrededor de 80 personas [34].

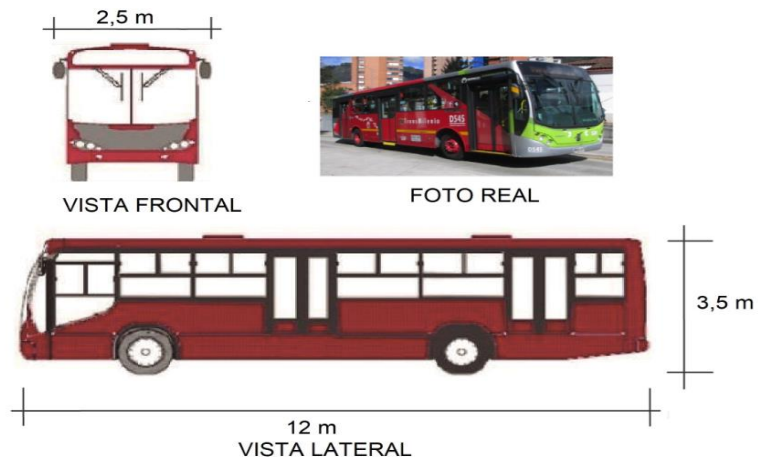


Figura 5. Bus padrón [34].

### **1.2.3 VENTAJAS DE LOS BUSES ELÉCTRICOS**

Los sistemas de transporte público con buses eléctricos cuentan con numerosas ventajas y beneficios de tipo económico, social, tecnológico y ambiental. A continuación, se mencionan algunas de estas ventajas:

- Facilidad para operar en ciudades con altas pendientes (como lo es el caso de Medellín).
- Compatibilidad con el medio ambiente, pues no emiten gases.
- Motores más eficientes y con menor consumo de energía respecto a un bus diésel [32].
- No necesitan vías exclusivas, haciendo su inversión inicial menor y su flexibilidad mayor al poder transitar por las vías ya construidas.
- Frenado regenerativo, es decir, la opción de recuperar energía eléctrica a partir de la cinética mientras está frenando. Esta característica de los sistemas de tracción puede generar ahorros energéticos considerables. Sin embargo, el aprovechamiento de esta energía implica sistemas de almacenamiento y control que devuelvan la energía al sistema cuando el bus lo necesite [2].
- Entre las ventajas sociales se puede destacar la mejora en la salud de los ciudadanos, al contribuir a la disminución de la polución en las ciudades.
- Menor costo en combustible para el funcionamiento de los buses.
- Menores impuestos y pago de incentivos para las empresas administradoras encargadas de las rutas [32].
- Disminución de la contaminación auditiva, visual y del aire.
- Menores costos de mantenimiento, que un bus diésel, debido a que los motores eléctricos requieren menor mantenimiento y la vida útil de sus componentes es mayor en comparación con otras tecnologías [35].

En el caso particular de los buses duales se pueden resaltar las siguientes ventajas:

- Dependiendo del sector por donde se quiera circular, los buses duales se pueden alimentar con catenaria o batería. Esto es ideal en tramos donde no sea viable la construcción de líneas aéreas debido al espacio reducido o factores arquitectónicos. Gracias a estos sistemas de respaldo, puede afirmarse que son un medio de transporte más flexible y práctico respecto a otros sistemas de tracción eléctrica.
- Mayor confiabilidad respecto a otros sistemas de tracción eléctrica, pues si la catenaria llegara a fallar, cuentan con las baterías de respaldo para hacer desplazamientos de emergencia.

### **1.2.4 FRENADO REGENERATIVO**

Los sistemas de tracción pueden contar con dos tipos de frenos: el mecánico y el frenado eléctrico. El frenado electrónico se da cuando se conecta una impedancia variable al generador acoplado a la transmisión, con lo cual se pueden conseguir desaceleraciones paulatinas, dependientes de la velocidad y del pedal del freno. Al disminuir la impedancia

aumenta el efecto del frenado regenerativo. Esta impedancia tiene un valor mínimo, en el cual entra a operar el frenado mecánico. La carga conectada es un medio de almacenamiento de energía eléctrica, para el caso de estudio, una batería, con la cual se puede alimentar el motor, utilizando la energía generada. Gracias al frenado regenerativo se puede conseguir un mayor rendimiento de combustible [2].

Cuando se alcanza el estado de carga máximo, la batería no es una carga para la regeneración y, en consecuencia, se instalan elementos resistivos para disipar la energía del frenado. Su implementación hace que sólo se utilice el freno mecánico convencional para la detención total o para frenados críticos, logrando un aumento en los ciclos de la vida útil del sistema de frenado, disminuyendo a la vez costos de mantenimiento [2].

Se observa que, al poseer un frenado regenerativo, los sistemas de tracción eléctricos pueden obtener ahorros energéticos considerables, aunque esto implica diseñar un excelente sistema de control y de almacenamiento que logre devolver esta energía al sistema cuando el bus se encuentre arrancando o cuando se encuentren dos o más buses sobre un mismo segmento de catenaria.

### **1.3 BATERÍAS PARA BUSES ELÉCTRICOS**

La evolución y desarrollo de las baterías ha contribuido con la mejora de los sistemas de tracción. Las baterías son arreglos de celdas electroquímicas, con la capacidad de almacenar energía y entregarla cuando se requiera. Estas últimas convierten energía química en energía eléctrica mediante una reacción reversible que altera las características de sus elementos constituyentes [1].

Una batería está compuesta por dos elementos básicos: los electrodos y el electrolito. El electrolito es una solución iónica que permite el paso de corriente entre los electrodos, los cuales son elementos metálicos, unos positivo (cátodo) y otro negativo (ánodo) . Con base en los elementos químicos que componen los electrodos y el electrolito, existen varios tipos de baterías con diversas características técnicas para diferentes aplicaciones [36].

La tecnología más antigua de baterías es la de plomo ácido, la cual ha sido la más utilizada; sin embargo, en los últimos años se han venido desarrollando y estudiando las baterías de litio, las cuales tienen grandes ventajas por su alta densidad de potencia y de energía, su alta eficiencia de almacenamiento, larga vida útil, es decir, múltiples ciclos de carga y descarga, capacidad de carga rápida respecto a otras tecnologías, baja necesidad de mantenimiento, y ausencia efecto memoria [1].

Para el funcionamiento de las baterías de litio se pueden utilizar diferentes materiales para el cátodo, según el cual se define la tecnología. El ánodo normalmente es de grafito y el electrolito conductor suele ser una solución de sales de litio. Esta tecnología ha evolucionado bastante y los fabricantes están mejorando y haciendo nuevas combinaciones químicas del litio, como lo son dióxido de cobalto, níquel manganeso cobalto, litio ferro fosfato y litio titanato [37]. Estas dos últimas, al no ser elementos metálicos, evitan la

inestabilidad del litio y tienen la ventaja de no contener materiales tóxicos; por lo tanto, son menos contaminantes y más seguras que las de plomo ácido [37].

Para el caso en estudio, se utilizará la tecnología de Litio Ferrofosfato (LiFePO<sub>4</sub>). Este tipo de batería es una de las mejores alternativas para la tracción eléctrica, debido al rango de voltaje y las buenas características de seguridad que brinda su composición química [38].

A continuación se exponen las principales características de este tipo de tecnología, que hacen que sea típicamente utilizada para tracción eléctrica:

- Robustez: A diferencia de las baterías de plomo ácido, las de litio ferrofosfato (LFP) no ven afectada su vida útil por la forma en la que se realice la recarga. Este tipo de baterías no necesita estar completamente descargadas para iniciar la recarga.
- Eficiencia: La eficiencia de ciclo completo (descarga de 100% a 0% y recarga de 0% al 100%) de una batería de plomo ácido es cerca de 80%, mientras que la de LFP es cercana al 92%.
- Tamaño y peso: En comparación con las de plomo ácido, se logra un ahorro de espacio y peso de hasta 70%.
- Flexibilidad para la carga, pues el rango de voltaje de carga puede variar (siempre y cuando ninguna celda esté sometida a más de 4,2 V).
- Amplio rango de temperatura de trabajo.
- Excelente rendimiento cíclico.
- Baja resistencia interna.
- Los materiales constitutivos no son tóxicos y su procesamiento al final de la vida útil no representa riesgos elevados.
- Larga vida útil (tanto en años como en ciclos).
- Permite mantener el voltaje de salida hasta el momento de la descarga completa [39].
- No requiere mantenimiento.

En la Tabla 3 se presentan algunas de las principales propiedades técnicas de estas baterías de litio ferrofosfato LiFePO<sub>4</sub>.

*Tabla 3. Características de baterías de LiFePO<sub>4</sub>, [3], [37], [39].*

Voltaje de una celda	
Voltaje mínimo de descarga	2,5 V
Voltaje de trabajo	3,0 ~ 3,3 V
Voltaje nominal	3,2 V
Voltaje máximo de carga	3,65 V
Carga (basado en tasa de carga C)	1C típico, carga a 3,65 V
Capacidad de la celda	14-45 Ah Se asume un valor de 30 Ah

Energía gravimétrica	115-146 Wh/kg Se asume un valor de 130 Wh/kg
Densidad energética	200 Wh/L
Potencia específica	> 300 W/kg
Energía/ precio consumidor	0.5-2.5 Wh/\$US
Durabilidad (tiempo)	> 10 años
Durabilidad (ciclos)	1000-3000 ciclos
Temperatura de trabajo	-20°C ~ 45°C
Composición del cátodo:	90% C-LiFePO <sub>4</sub>
	5% Carbono EBN 10-10 (grafito)
	5% PVDF

En la Figura 6 se puede observar la relación entre las características de este tipo de baterías, donde se puede apreciar su excelente potencia específica, seguridad y tiempo de vida.

Este tipo de batería, que ya ha sido implementado en diferentes tipos de buses, como el Eurabus, ofrece tres sistemas de carga: lenta, la cual se puede llevar a cabo durante la noche en un tiempo aproximado de 5 horas; rápida, con la cual las baterías se pueden cargar en 2,5 horas; y ultra rápida, que requiere solamente 1 hora de carga [40]. Esta característica de diferentes modelos de carga, además de la propiedad que les permite cargar en cualquier momento del ciclo, hacen que sean baterías de alta flexibilidad y gran aplicabilidad.

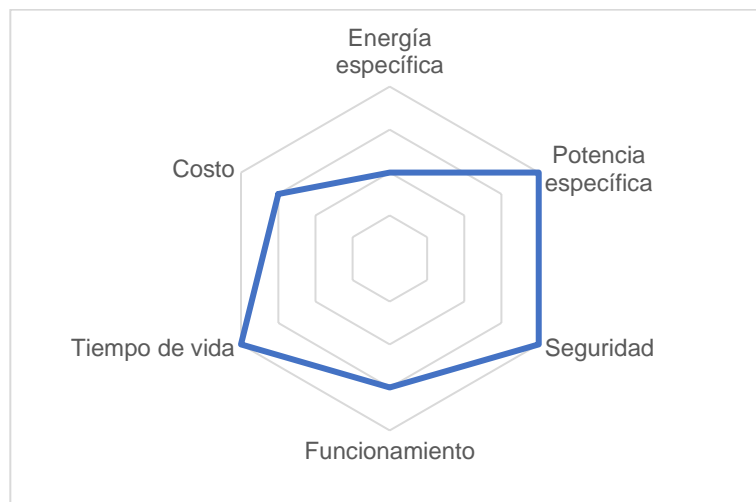


Figura 6. Relación entre las características para las baterías de Litio Ferrofosfato [41].

Una desventaja que presentan las baterías LFP es que su vida útil es cercana a los diez años, y que al final de su rango operativo puede disminuir al 80% de su capacidad inicial [35]. Esta condición puede generar sobredimensionamientos en las baterías, costos

adicionales de reposición, o incluso un incremento en la flota, para mantener los kilómetros operativos.

Los fabricantes llevan a cabo pruebas de los ciclos de vida de las baterías, para determinar la pérdida gradual del rango efectivo de las baterías. En los datos presentados por algunos fabricantes, como BYD [42], las baterías de LPF tienen una disminución del 21% de su capacidad a los 6000 ciclos, cuando la carga y descarga se realiza a 1C y temperatura ambiente (25 °C). Por otra parte, para una temperatura de 60°C, se puede apreciar una disminución de su rango operativo del 29% en 2100 ciclos, con la tasa de carga y descarga de 1C. En el caso de tasas de carga mayores, por ejemplo, cuando la tasa de carga es de 3C, la pérdida es del 20% en 3000 ciclos. Para el caso de paquetes de 100 baterías en serie, la pérdida de capacidad es del 10% en 600 ciclos.

Otra desventaja por considerar en las baterías es el gran peso que tienen. Los pesos en vacío de los buses eléctricos son similares a la masa de los autobuses diésel, excluidas las baterías de tracción. Los pesos de las baterías suelen ser de varias toneladas lo cual significa sacrificar la capacidad de pasajeros, como se ilustra en la Figura 7.

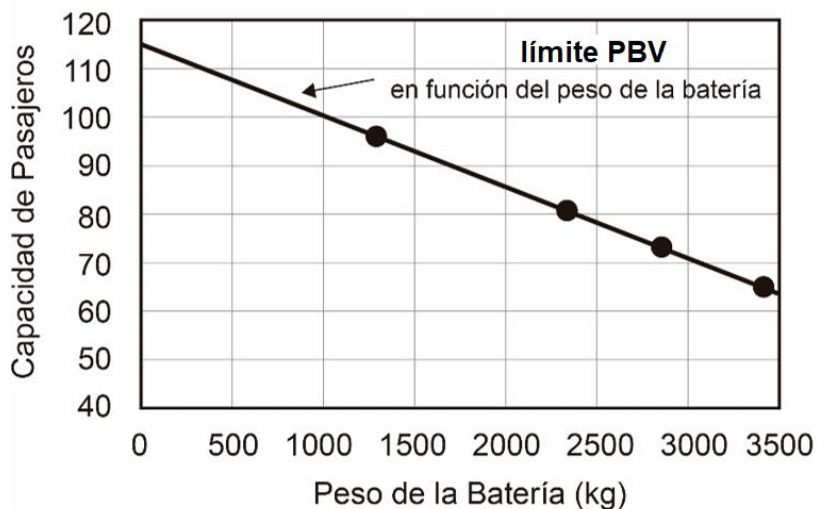


Figura 7. Capacidad de pasajeros para un bus de 12 m, en función del peso de la batería [3].

Cabe aclarar que las baterías utilizadas para los trolebuses se plantean como un respaldo, es decir, las líneas de DC son la fuente principal y las baterías sólo se conectan en casos especiales donde no es posible la instalación de catenarias o en los casos que ésta falle. Adicionalmente, puede considerarse la opción de recargas las baterías de los trolebuses con la energía cinética recuperada en el frenado, y así disminuir aún más el consumo de energía.

## 1.4 SUBESTACIONES DE TRACCIÓN

Las subestaciones de tracción son el medio de abastecimiento de energía para las catenarias y para asegurar el funcionamiento de los vehículos de tracción eléctrica para el transporte de personas o mercancías [43]. Su principal función consiste en adecuar el nivel de tensión al nivel requerido para el funcionamiento de los vehículos, en este caso, de los trolebuses [35]. El sistema de alimentación en tracción eléctrica está compuesta por la subestación generadora, la red de transporte, la subestación de tracción y la línea área de contacto [44].

Las subestaciones de tracción presentan dos tipos de alimentación y equipos: La parte en alterna, la cual está compuesta por las líneas del operador de red, quien suministra la energía, las protecciones asociadas, los elementos de maniobra (seccionadores e interruptores), elementos de medida y protección, y el transformador de potencia, el cual tiene como función reducir la tensión de la red a un nivel relativamente bajo. Luego se tiene la parte en corriente continua, la cual está conformada por el grupo rectificador, filtros de armónicos, y celdas para las salidas de las acometidas, que a su vez alimentan la catenaria. En la Figura 8 se presenta un esquema de la configuración de las subestaciones de tracción.

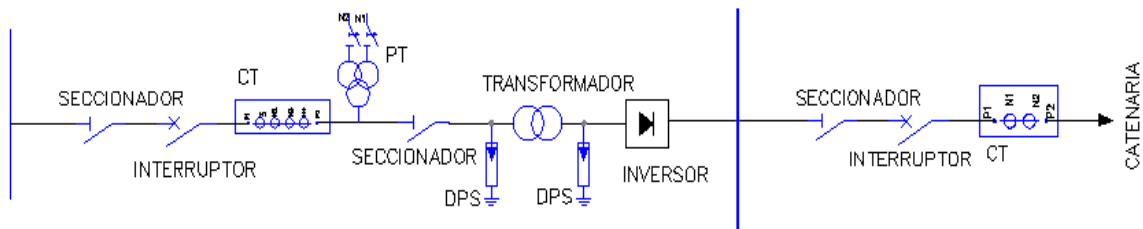


Figura 8. Diagrama unifilar general de una subestación de tracción [45].

Todos estos equipos son necesarios para transformar el voltaje (magnitud y frecuencia) de manera tal que sea apto para ser usada por las cargas de tracción, a través de las catenarias [45].

Las catenarias no son el único elemento que conforman la red de alimentación. Se tiene que tener en cuenta que también es necesaria la instalación de soportes que sujetan cada segmento de catenaria. Estos soportes son un conjunto de postes, ménsulas (brazos que se conectan a los postes para soportar las catenarias) y aisladores para evitar el contacto eléctrico entre la catenaria y la ménsula [43].

## 1.5 ESTRATEGIAS PARA LA RECARGA DE BUSES ELÉCTRICOS

Los esquemas de recarga para las baterías de vehículos eléctricos se pueden clasificar en dos grandes categorías: Recarga dinámica o en movimiento, y recarga estacionaria.

El sistema de carga estacionaria es actualmente la forma de recarga más popular. Este sistema se puede clasificar en carga lenta y carga rápida. La carga lenta se suele utilizar en horas de la noche para buses con baterías de grandes capacidades, de forma que se puedan usar todo el día, sin la necesidad de recargarse. Esto genera un aumento en los costos de las baterías, pero disminuye el impacto de operación del bus, pues su batería no es recargada durante su operación [46]. La carga rápida emplea potencias elevadas, disminuyendo los tiempos de recarga. Este esquema de recarga puede emplearse en los patios de los buses con conectores manuales, o a lo largo de la ruta con cargadores de conexión automática, esquema que se conoce como carga de oportunidad.

El esquema estacionario de recarga crea la necesidad de construir puntos de carga dentro de las rutas o en los depósitos de los buses lo cual, dependiendo de su cantidad en función de la longitud de la ruta, pueden incrementar el costo inicial de los proyectos [26]. Además, también aumenta los tiempos de parada y por ende el tiempo total del recorrido de la ruta.

El otro esquema es la carga en movimiento, cuya ventaja radica en que el vehículo no tiene que detenerse ni modificar los tiempos de la ruta. Este esquema de recarga normalmente se realiza mediante la instalación de cables aéreos (catenarias), las cuales se conectan a los buses mediante el trole. Por lo regular, las catenarias han sido utilizadas para la tracción de los buses, sin embargo, en este esquema también son usadas para la recarga de las baterías [3], [26]. Otro beneficio de este esquema es que las baterías de los buses suelen ser de menor tamaño, sin embargo, se aumenta considerablemente los costos de infraestructura, en particular por el mayor tamaño de las subestaciones de tracción, debido a la energía requerida y las potencias demandadas.

Existen otros tipos de recarga en movimiento, como la transferencia de energía inalámbrica (WPT por sus siglas en inglés *Wireless Power Transfer*), la cual también puede ser aplicada en carga estacionaria. Según [25], la instalación de catenaria tiene ventajas sobre este otro esquema, como lo son menores costos iniciales, mayor eficiencia, mejor rendimiento en las velocidades y mayor transferencia de energía.



## **2 METODOLOGÍA**

En este capítulo se describe la metodología general para la realización de este estudio, explicando los principales componentes para la elaboración del trabajo de grado. También se presenta una descripción de los diferentes programas utilizados para simular la ruta Circular Sur 302 y analizar su consumo energético, y las ecuaciones fundamentales para calcular los esfuerzos de tracción de cada bus de acuerdo con las características topográficas de la ruta y las consignas operativas de la flota.

### **2.1 METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL ESTUDIO**

Inicialmente se hizo una búsqueda de información y vigilancia tecnológica, con el fin de estudiar artículos científicos sobre temas de interés, como buses eléctricos y baterías de LFP.

En un principio se seleccionó la ruta Circular Sur 302 por ser una de las más extensas de la ciudad y por ende un excelente caso de estudio para el análisis de la implementación de buses eléctricos duales para cubrir su recorrido. Para efectuar este estudio fue fundamental reunir información sobre la ruta, con el fin de poder obtener los datos de entrada para las simulaciones. Inicialmente se utilizó el aplicativo Google Earth para parametrizar la ruta. También fue necesario analizar la topografía de la ruta y la ubicación de los paraderos para determinar los segmentos donde fuera factible la instalación de catenarias y los segmentos que serían alimentados con baterías.

Posteriormente se seleccionaron las características del bus eléctrico (dimensiones, capacidad y datos del motor). Se escogieron buses tipo padrón, pues son similares en características a los buses que operan actualmente en la ruta. También se desarrolló la curva de tracción con los datos técnicos del bus y del motor elegido. Con esta información se desarrolló la simulación en Open Track, para determinar los consumos energéticos de un bus. Luego, asumiendo que todos los buses tienen el mismo comportamiento y conociendo los tiempos de despacho de la flota (horas de operación diarias y tiempos de espera en las paradas), se procedió a hacer un procesamiento de los datos en Matlab, con el fin de determinar los consumos totales para un día de operación.

Se definieron tres casos de estudio, cada uno con diferentes porcentajes de electrificación, con el propósito de efectuar comparaciones entre ellos y ver cuál sería el más adecuado de implementar.

Conociendo el comportamiento energético de un bus, definiendo la potencia de recarga suministrada por las catenarias y analizando el estado de carga de las baterías, se pudo determinar la capacidad de éstas. Además, con la información de los consumos de energía de la flota completa se pudo proceder con el dimensionamiento de las subestaciones de tracción.

Finalmente, luego de haber seleccionado los buses, baterías y la infraestructura de carga y alimentación, se efectuó un análisis de costos con el fin de determinar cuál de los casos de estudio sería más factible de implementar.

En la Figura 9 se presenta un esquema de la metodología implementada para desarrollar este estudio.

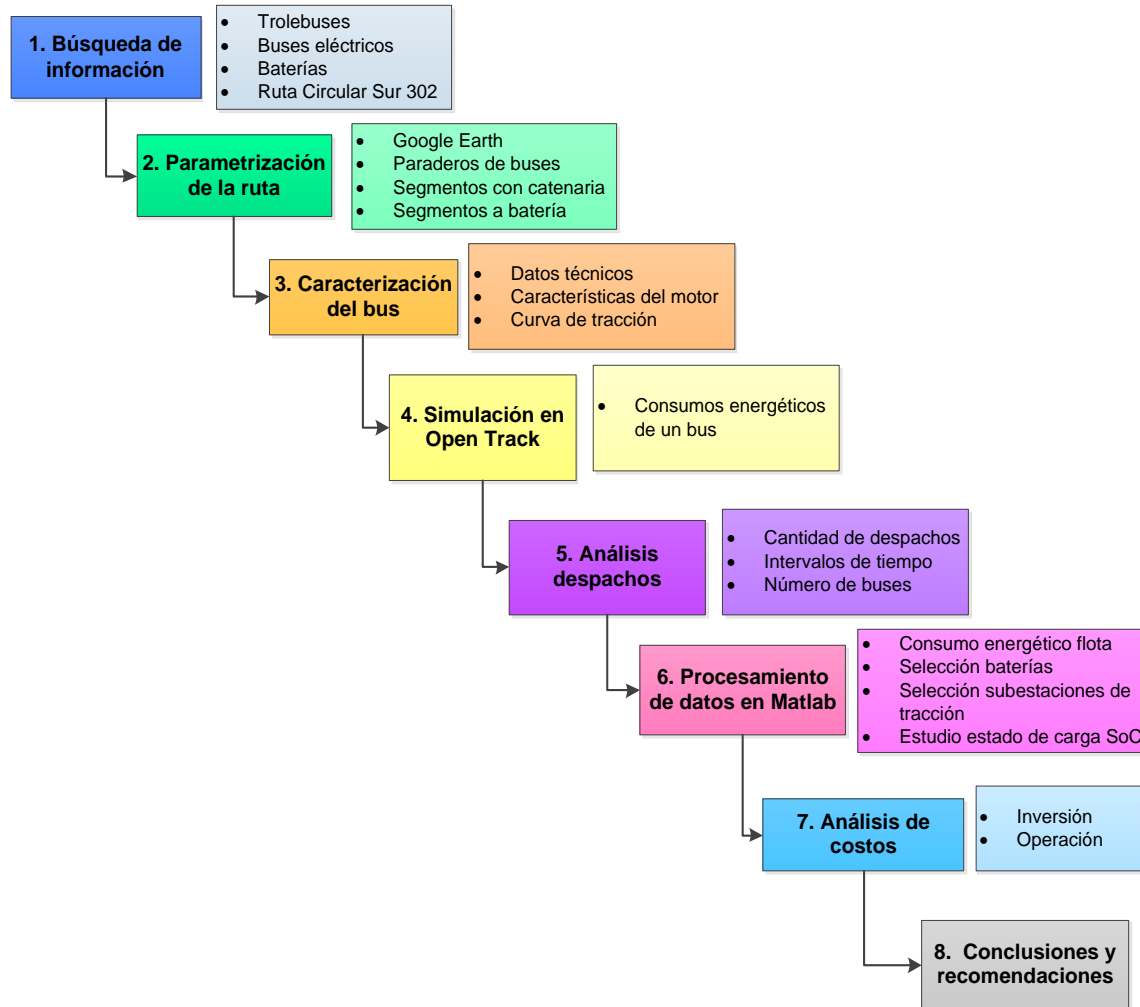


Figura 9. Metodología para el desarrollo del estudio.

## 2.2 SOFTWARE

Para el desarrollo de este estudio se utilizaron dos software con el fin de simular el sistema de tracción eléctrico y llevar a cabo los cálculos de consumos energéticos para dimensionar y seleccionar las baterías y subestaciones más adecuadas para alimentar la flota de la ruta Circular Sur 302. Estos software son OpenTrack y Matlab, los cuales se describen a continuación.

### 2.2.1 OPENTRACK

El programa OpenTrack nació de un proyecto de investigación cuyo objetivo consistía en desarrollar una aplicación capaz de simular la explotación ferroviaria de manera completa y precisa. Fue desarrollado en Zúrich, Suiza, en la Escuela Politécnica Federal por el Instituto de Transportes y de Construcción de Carreteras y Ferrocarriles. Hoy en día es ampliamente utilizada por empresas ferroviarias, ingenieros e institutos universitarios [48].

En la Figura 10 se presentan los principales componentes para tener en cuenta en la simulación.

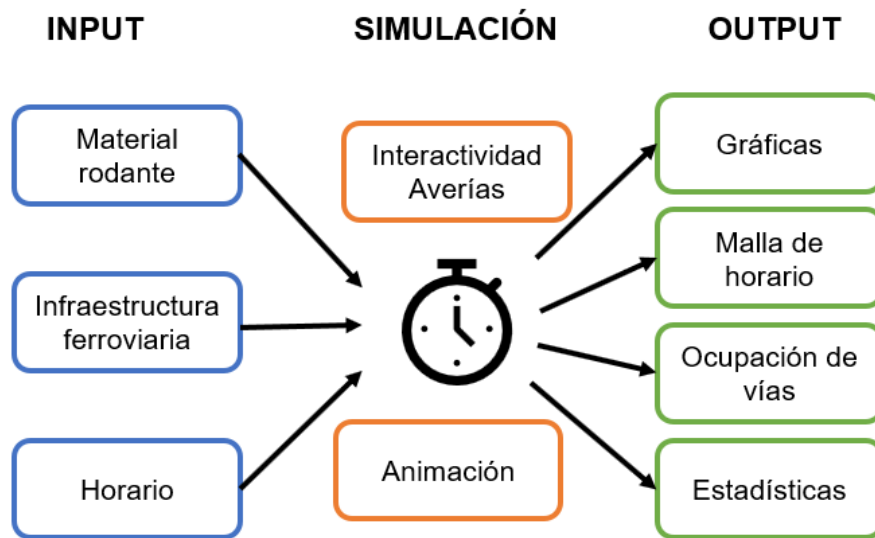


Figura 10. Componentes de la herramienta de simulación [48].

Los datos de entrada para un caso de simulación en OpenTrack son los siguientes:

- Material rodante: hace referencia a los datos técnicos del vehículo, tales como tamaño, peso, medidas, curva de tracción, voltaje de alimentación, velocidad máxima, velocidad nominal y factor de adherencia, entre otros.
- Infraestructura ferroviaria: considera las características propias de la vía, es decir, las curvas, los radios de curvatura, la pendiente, la velocidad permitida, la señalización, etc. La ruta inicialmente es trazada en Google Earth y de ahí se toman los valores en coordenadas para luego incluirlos en el OpenTrack.
- Horarios: la cantidad de despachos y los rangos horarios, para las salidas y las diferentes paradas.[48]

A pesar de que el programa inicialmente está considerado para sistemas ferroviarios, puede ser utilizado en este estudio, pues los datos de entrada son similares para el caso de un bus (pesos, dimensiones y esfuerzos de tracción), diferenciándose principalmente en los coeficientes de fricción entre los neumáticos de caucho y el pavimento.

Este programa hace la simulación y entrega los datos, segundo a segundo, del recorrido completo de un bus. Los datos suministrados por OpenTrack son: distancia, velocidad, aceleración, esfuerzo de tracción, potencia mecánica, potencia eléctrica y energía. Esta información se analizó para poder determinar los consumos energéticos de la flota completa, teniendo en cuenta los despachos de los buses y considerando que todos los buses tienen igual comportamiento.

### **2.2.2 MATLAB**

Esta herramienta informática permite realizar diferentes cálculos matemáticos, tales como la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos. Tiene un entorno de desarrollo integrado con su propio lenguaje de programación y es multiplataforma [49].

Además de efectuar cálculos, permite crear gráficos de muchos tipos e incorpora la capacidad de programar, desarrollando algoritmos y creando modelos. Cuenta con herramientas adicionales como lo son Simulink, una plataforma de simulación multidominio, y con GUIDE, que es un editor de interfaces de usuario [50].

Gracias a su capacidad de manejo de grandes cantidades de datos, la utilización de este software de programación resulta muy oportuna para elaborar un modelo con el propósito de dimensionar la flota adecuada para la ruta Circular Sur 302 y determinar sus consumos energéticos, partiendo de los resultados obtenidos con el programa OpenTrack.

### **2.3 CÁLCULO DE ESFUERZOS DE TRACCIÓN**

A la hora de elaborar las simulaciones energéticas de la flota, es fundamental considerar los esfuerzos de tracción ejercidos por los motores de los buses. Estos esfuerzos de tracción deben superar las resistencias de movimiento que presentan los vehículos, cada vez que hay un cambio en el régimen de marcha. Todas estas pérdidas son consideradas por el software OpenTrack.

Las resistencias al movimiento son de muchas naturalezas y están ligadas al peso y velocidad del vehículo. Pueden clasificarse así [51]:

- Resistencia al avance
  - Resistencia a la rodadura: por rozamiento de cojinetes, conicidad de la llanta, por irregularidades en la vía, etc.
  - Resistencia al aire: por rozamiento del aire durante la marcha y la presión de la masa de aire desplazada.
- Resistencias planialtimétricas: por rampas o por curvas.
- Resistencias de inercia: representada por la energía necesaria para transmitir al vehículo los cambios de velocidad, desde el reposo o desde un régimen de marcha (arranques y aceleraciones)

A continuación se explica en más detalle cada una de estas categorías.

### 2.3.1 RESISTENCIA AL AVANCE

Esta resistencia depende del tipo del vehículo, de la masa, velocidad, aerodinámica y otros factores internos del bus. Esta resistencia, debida al movimiento, se encuentra presente en todo el trayecto, independientemente si es recto, curvo o con alguna pendiente [51].

Esta resistencia puede ser calculada a través de la ecuación de Davis, que considera los factores de influencia descritos anteriormente, y que se presenta a continuación:

$$r_N(v) = a + b \cdot v + c \cdot v^2 \quad \text{Ec. 1}$$

donde:

$r_N$ : Resistencia específica global.

$a$ : Coeficiente que representa los efectos de rodamiento.

$b$ : Coeficiente que engloba la influencia de los choques en juntas de la vía.

$c$ : Coeficiente que representa la resistencia del aire.

$v$ : Velocidad del tren.

### 2.3.2 RESISTENCIA POR CURVATURA

Esta resistencia se presenta cuando el vehículo enfrenta una curva, debido a que el sistema debe acomodarse para compensar el hecho de que una rueda recorra mayor camino (radio externo) y la otra un camino más corto (radio interno), lo cual genera un aumento en el roce de las ruedas. Esta resistencia depende del radio de curvatura y la trocha (distancia entre los ejes de las ruedas). Esta resistencia está dada por la siguiente ecuación:

$$r_c = \frac{500 t}{R} \cdot M \cdot g \quad \text{Ec. 2}$$

donde:

$r_c$ : Resistencia por curvatura [N].

$t$ : Trocha [m].

$R$ : Radio de curvatura [m].

$M$ : Masa del vehículo [Ton].

$g$ : Gravedad [m/s<sup>2</sup>].

### 2.3.3 RESISTENCIA POR PENDIENTE

La resistencia debida a la pendiente depende del peso del vehículo en su componente paralelo al sentido de la vía, como se muestra en la Figura 11.

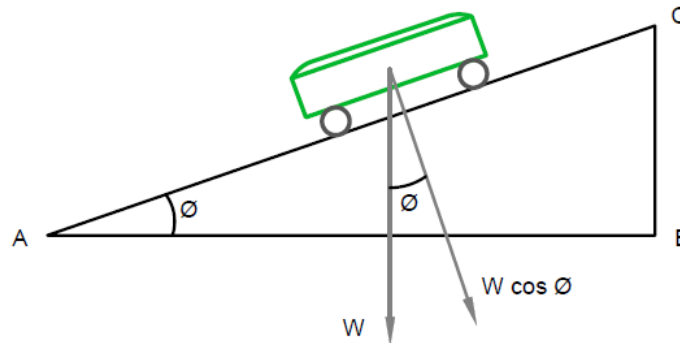


Figura 11. Descomposición de la masa del tren en una componente normal y una componente paralela a la vía [51].

La resistencia debida a la pendiente estará dada por:

$$r_G = W \sin \phi \quad \text{Ec. 3}$$

donde:

$r_G$ : Resistencia por la pendiente [N].

$W$ : Peso del vehículo [N].

$\phi$ : Ángulo de la pendiente.

Normalmente la pendiente se suele expresar como un coeficiente  $\alpha$ , el cual equivale a  $\tan \theta$ , debido a que se establece que la aproximación  $AB \approx AC$ . Este coeficiente representa los grados de inclinación, como la tasa de variación respecto al plano horizontal por unidad de distancia recorrida y su unidad es  $^{\circ}/\infty$  y por lo tanto la ecuación se puede escribir como:

$$r_G = W \cdot \alpha \quad \text{Ec. 4}$$

### 2.3.4 CURVA DE TRACCIÓN

El esfuerzo de tracción se produce por el conjunto neumático-motor. Éste se origina en el torque aplicado por el motor al eje de la rueda en el área de contacto, es decir, el bus acelera a través de la aplicación de fuerzas de tracción. El motor diésel funciona con grandes torques y bajas velocidades; la fuerza de tracción en cada marcha varía con la velocidad del vehículo, lo que significa que, en un cambio bajo, la fuerza de tracción es mayor, lo cual produce mayor aceleración pero bajas velocidades. En la Figura 12 se puede apreciar el esfuerzo de tracción no uniforme de un motor diésel resultante de los cambios que tiene el motor [52].

Por otro lado, los motores eléctricos tienen la capacidad de generar torque a velocidad cero, como se presenta en la Figura 12.

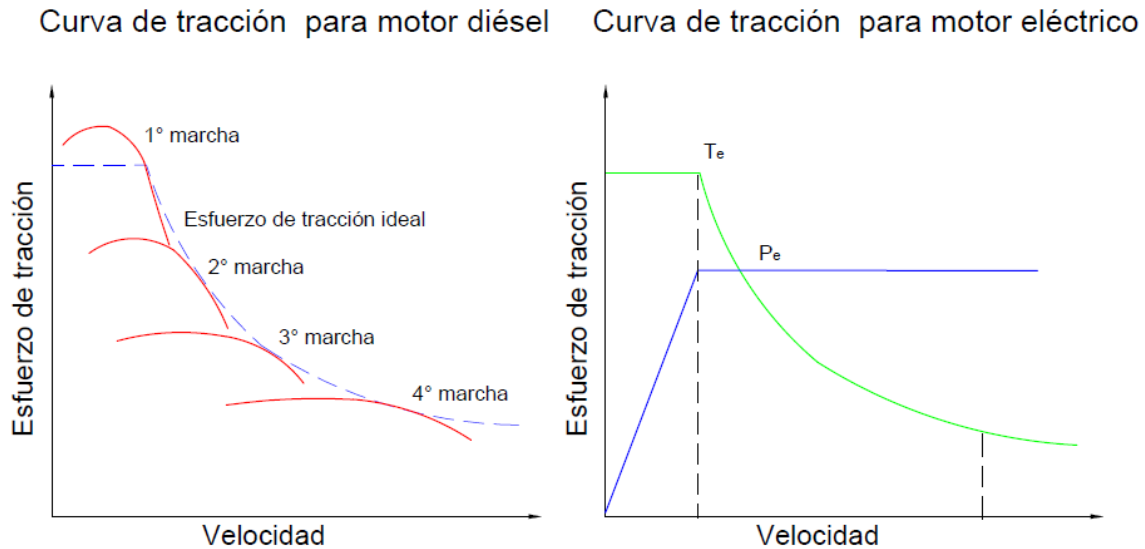


Figura 12. Curva de tracción para motor diésel y motor eléctrico [52].

Para poder determinar la curva de tracción es necesario conocer información sobre el motor y conceptos básicos sobre movimiento circular.

En la Ecuación 5, se presenta como calcular la velocidad angular del motor, asumiendo una velocidad angular de la rueda y conociendo la relación de transmisión del motor.

$$\omega_{mr_{motor}} = \omega_{mr_{rueda}} \cdot \text{relación de transmisión} \quad \text{Ec. 5}$$

donde:

$\omega_{mr_{motor}}$ : Velocidad angular del motor (rad/s).

$\omega_{mr_{rueda}}$ : Velocidad angular de la rueda (rad/s)

Para calcular la velocidad angular de la rueda, debe conocerse el radio de las ruedas:

$$\omega_{mr_{rueda}} = \frac{V_T}{R} \quad \text{Ec. 6}$$

donde:

$V_T$ : Velocidad tangencial (m/s).

$R$ : Radio de las ruedas (m).

Conociendo la potencia del motor y habiendo calculado su velocidad angular, se puede determinar el torque del motor en cada punto, según la Ecuación 7.

$$P_{motor} = T_{motor} \cdot \omega_{mr_{motor}} \quad Ec. 7$$

donde:

$P_{motor}$ : Potencia del motor (kW).

$T_{motor}$ : Torque del motor (kNm).

Para calcular el torque en la rueda, se sabe que éste es igual al del motor por la relación de transmisión, como se describe en la Ecuación 8.

$$T_{rueda} = T_{motor} \cdot \text{relación de transmisión} \quad Ec. 8$$

donde:

$T_{rueda}$ : Torque de la rueda (kNm)

Por último, como se presenta en la Ecuación 9, para determinar el esfuerzo de tracción se debe hallar la relación entre el torque de las ruedas y su radio.

$$F_{rueda} = \frac{T_{rueda}}{R} \quad Ec. 9$$





En la Tabla 4 se presenta la información principal de la ruta circular sur 302.

*Tabla 4. Información general ruta Circular Sur 302.*

<b>Empresa</b>	SANTRA-COOTRABEL-COONATRA-SOTRAMES
<b>Servicio</b>	302
<b>Nombre</b>	Circular izquierda
<b>Tipo de ruta</b>	Directa
<b>Tipo de vehículo</b>	Bus
<b>Capacidad</b>	60 pasajeros
<b>Longitud</b>	20,93 km
<b>Frecuencia</b>	32 bus/h
<b>Velocidad promedio</b>	12,60 km/h
<b>Tiempo de viaje</b>	99,7 minutos
<b>Flota técnica</b>	54 buses
<b>Flota legal</b>	63 buses

Es importante aclarar que los datos presentados fueron suministrados por el grupo de investigación de Transmisión y Distribución de Energía (TyD) de la Universidad Pontificia Bolivariana.

Adicionalmente, en la Tabla 5 se presentan los rangos horarios para calcular los despachos diarios que exige la operación de la ruta Circular Sur 302. Para calcular la cantidad de despachos, se debe tener en cuenta la frecuencia promedio de despacho, la cantidad de horas del rango horario y un factor de utilización del bus, el cual en horas pico es del 100% y en horas valle puede variar entre el 50% y el 70%, la cual también incluye los intervalos de salida de un bus según los rangos horarios.

*Tabla 5. Rangos horarios de despachos.*

	<b>Valle AM</b>	<b>Pico AM</b>	<b>Valle AM</b>	<b>Valle Tarde</b>	<b>Pico PM</b>	<b>Valle PM</b>
<b>Rango</b>	4:00-5:00	5:00-7:00	7:00-15:30	15:30-17:00	17:00-19:00	19:00-23:00
<b>Horas</b>	1	2	8,5	1,5	2	4
<b>Factor</b>	0,5	1	0,5	0,7	1	0,5

En la Tabla 6 se describe la cantidad de despachos e intervalo de tiempo de los despachos para la ruta Circular Sur 302. Como se puede apreciar en esta tabla, en las horas pico se hace necesario transportar a una mayor cantidad de personas y, por lo tanto, la frecuencia de despacho es mayor que en las horas valle.

Tabla 6. Cantidad de despachos e intervalo de tiempo de los despachos.

	Valle AM	Pico AM	Valle AM	Valle Tarde	Pico PM	Valle PM
<b>Rango</b>	4:00-5:00	5:00-7:00	7:00-15:30	15:30-17:00	17:00-19:00	19:00-23:00
<b>Cantidad de despachos</b>	16	64	136	34	64	64
<b>Frecuencia despacho (min)</b>	3,75	1,88	3,75	2,68	1,88	3,75
<b>Frecuencia despacho (s)</b>	225	112,5	225	160,71	112,5	225

Adicionalmente, se debe parametrizar la vía del recorrido de la ruta, descargando los datos relevantes, referentes a la latitud, longitud, altura, distancia, pendiente, curvas, existencia de túneles en la vía, entre otros. Para llevar a cabo lo anterior, se trazó la ruta a través del programa Google Earth. Esta información se presenta en el Anexo 1.

En la Figura 14 se presenta la ubicación en Google Earth de la ruta Circular Sur, con las cincuenta y una paradas y los ocho segmentos definidos para el estudio. Como se puede apreciar a continuación, se toma como punto de partida la calle 45 con carrera 79A.

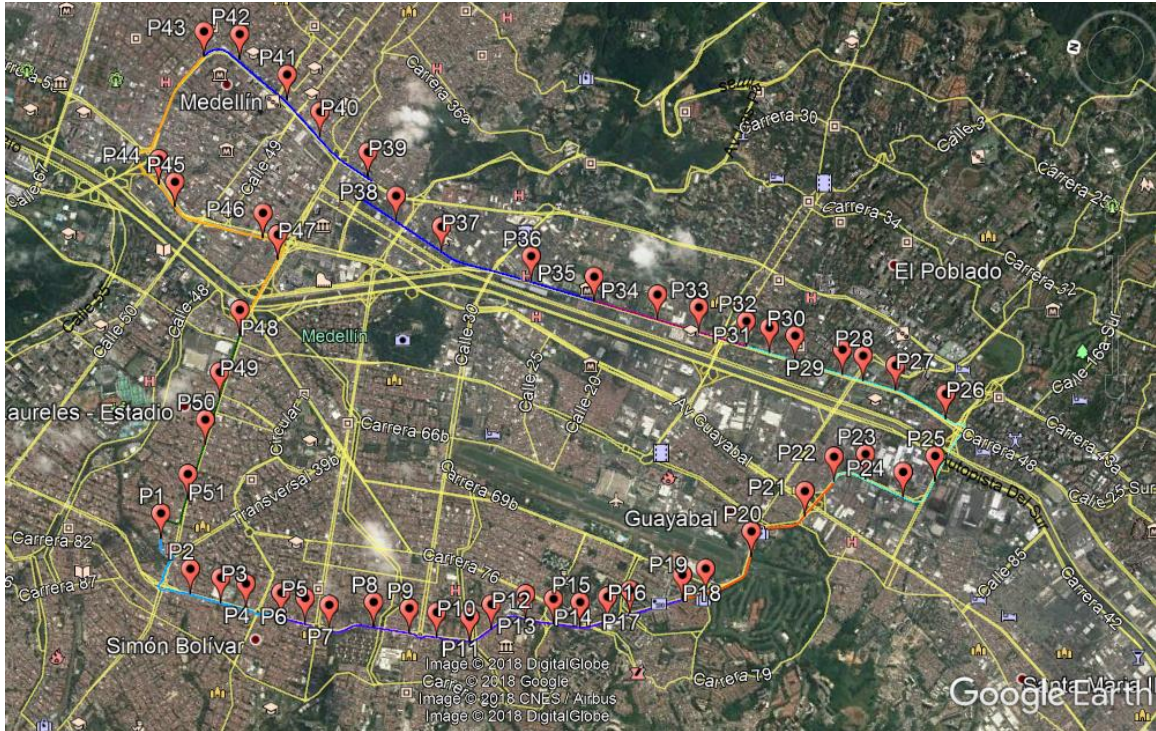


Figura 14. Ruta Circular Sur 302 izquierda con paradas y segmentos [55].

## 3.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS BUSES

### 3.2.1 DATOS TÉCNICOS

En primer lugar, es necesario llevar a cabo la simulación del recorrido de la ruta Circular Sur 302, introduciendo al programa los datos reales necesarios, incluyendo la cantidad de buses según los rangos horarios, las características del recorrido y los parámetros de los buses.

Para el caso analizado, se efectuó la simulación con el trolebús padrón marca Vossloh Kiepe de Atenas [56], con las características presentadas en la Tabla 7. La curva de tracción de este tipo de vehículo se presenta en la Figura 15.

Tabla 7. Datos técnicos trolebús Vossloh Kiepe.

Parámetro	Dato
<b>Generales</b>	
Diseño	Trolebús de 2 ejes
Voltaje nominal	600 V <sub>DC</sub> (+25%, -30%)
Energía para calefacción	0 kW
Energía para aire acondicionado	0 kW
Velocidad máxima	65 km/h
Velocidad promedio	20 km/h
Máxima aceleración	1,5 m/s <sup>2</sup>
Desaceleración de frenado (eléctrico)	1,3 m/s <sup>2</sup>
Relación de transmisión	11,02:1
Radio de llantas	0,5 m
Peso vacío	13700 kg
Peso adherido	5800 kg
Peso neto	19500 kg
Número de pasajeros	84 Cant
De pie	27+1
Sentados	56
Longitud del vehículo	12 m
Anchura del vehículo	2,5 m
Altura del vehículo	3,5 m
Superficie frontal del vehículo	8,75 m <sup>2</sup>
<b>Tracción del motor</b>	
Potencia nominal	210 kW
Velocidad nominal	1479 min <sup>-1</sup>
Voltaje nominal	420 V
Corriente nominal	351 A

La curva de tracción del vehículo utilizado para el trabajo se presenta en la Figura 15. Para calcular esta curva se utilizaron datos de un trolebús padrón marca Vossloh Kiepe de Atenas [56], presentados en la Tabla 7, y las ecuaciones 5, 6, 7, 8 y 9 para calcular el torque máximo y varios puntos de la gráfica.

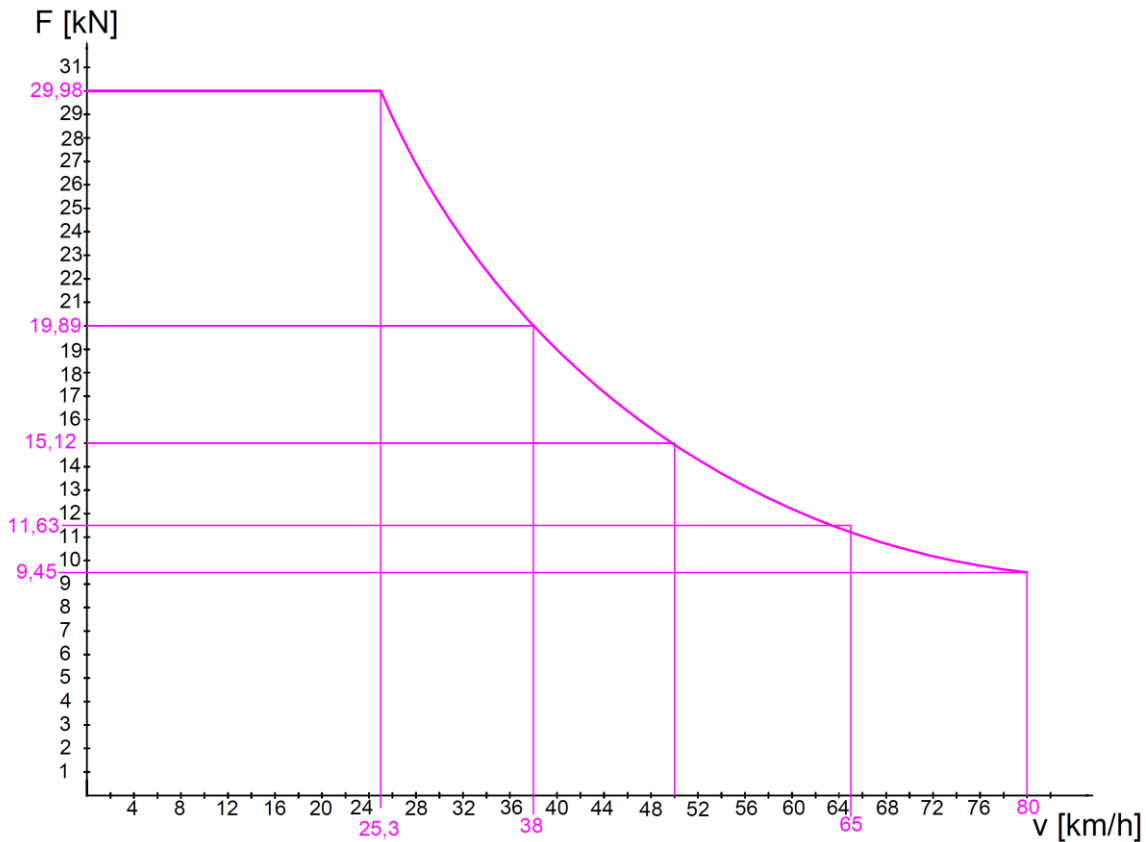


Figura 15. Curva de tracción del bus padrón.

### 3.3 ANÁLISIS ZONAS DE ELECTRIFICACIÓN

Para el desarrollo de este estudio, se efectuó un análisis de la ruta, con el fin de verificar en dónde es factible instalar catenarias para la alimentación de los trolebuses. En un principio el objetivo era no instalar catenarias en lugares como deprimidos, puentes y glorietas. No obstante lo anterior, y en vista de que se tendrían demasiados segmentos de análisis (22 en total, 11 a batería y 11 con catenaria), con notorias diferencias en la longitud, por la topología de la ruta (la cual presenta muchas glorietas y deprimidos), se optó por analizar los sistemas de trolebuses en el mundo, con el fin de verificar como se planteaban las rutas por estos pasos problemáticos. Sin embargo, se debe aclarar que se tendría un aumento en los costos de la infraestructura, debido a la necesidad de mayor cantidad de accesorios para la instalación de curvas en las catenarias.

En las siguientes figuras se presentan rutas de trolebuses con catenarias en curvas y deprimidos, donde se puede apreciar la instalación de diferentes accesorios, con objetivo de darle continuidad a las catenarias en todo el recorrido. Adicionalmente, se muestran puntos específicos sobre la ruta Circular Sur 302 donde se pueden aplicar estas soluciones.



*Figura 16. Vía de trolebús pasando por glorieta en Comunidad Valenciana, España [57].*



*Figura 17. Glorieta de Don Quijote en la ruta Circular Sur 302 [58].*

Para el caso de paso debajo de puentes, como el puente de la Calle 4 Sur, se puede tomar como ejemplo la solución implementada en Gdynia, Polonia.



*Figura 18. Vía de trolebús pasando por puente en Gdynia, Polonia [59].*



*Figura 19. Puente de la Calle 4 sur en la ruta Circular Sur 302 [60].*

Cabe resaltar que, para el tramo en el cual la ruta pasa cerca del aeropuerto Olaya Herrera, por la normatividad vigente, no se pueden instalar catenarias. Teniendo en cuenta las

anteriores premisas y las soluciones descritas, se plantean segmentos con longitudes similares, tanto electrificados como no electrificados, con el fin de darle mayor uniformidad a los tramos.

Adicionalmente, se efectuó el análisis de los posibles porcentajes de electrificación y se tomaron 3 casos de estudio, los cuales se describen en las Tablas 8, 9 y 10. En el caso 1 se consideraron todas las posibles zonas a instalar catenarias, con lo cual se lograría una electrificación del 58,41%. En el caso 2 se planteó instalar catenarias en zonas contiguas, dejando una parte de la ciudad sin electrificar, con lo que el porcentaje de electrificación sería de 29,60%. Finalmente, para el caso 3, se planteó intercalar segmentos de catenaria en todo el recorrido, es decir, electrificando la ruta en diferentes puntos y logrando una electrificación del 40,63%.

Como se puede apreciar en la Tabla 9, en el caso 2 la electrificación en zonas contiguas implica que el bus tendría que recorrer distancias considerables sin el respaldo de la catenaria.

*Tabla 8. Longitudes totales electrificación y batería.*

Longitud total del recorrido	20 937m
Longitud total de posibles catenarias	12 230 m
Longitud total de para uso baterías	8 707 m
Porcentaje de electrificación	58,41%
Porcentaje de uso batería	41,59%



Tabla 9. Casos de estudio y porcentaje de electrificación.

<b>Caso estudio</b>	<b>Descripción</b>	<b>Longitud</b>	<b>% electrificación</b>
1	Todo el posible recorrido electrificado (Segmentos 2,4,6 8)	12 245	58,48%
2	Trayecto La 80 y San Juan (Segmentos 2 y 8)	6 197	29,60%
3	Zonas intercaladas electrificadas (Zonas 2,6 y 8)	8 506	40,63%

Tabla 10. Datos de electrificación ruta Circular Sur 302.

<b>Nombre</b>	<b>Descripción del trayecto</b>	<b>Longitud</b>	<b>Unidad</b>	<b>Longitud inicial</b>	<b>Longitud final</b>	<b>Ubicación paraderos</b>
1 Batería	Desde calle 45 con carrera 79A hasta carrera 81 (80) con calle 34 A	1 576	m	0	1 576	P1-P5
2 Catenaria	Desde carrera 81 (80) con calle 34 A hasta diagonal 75B con calle 1	3 571	m	1 577	5 147	P5-P18
3 Batería	Desde diagonal 75B con calle 1 hasta avenida 80 con carrera 51	1 721	m	5 148	6 868	P18-P22
4 Catenaria	Desde avenida 80 con carrera 51 hasta Avenida Las Vegas (carrera 48) con calle 9	3 481	m	6 869	10 349	P22-P32
5 Batería	Desde Avenida Las Vegas (carrera 48) con calle 9 hasta Avenida Las Vegas (carrera 48) con calle 19 <sup>a</sup>	1 308	m	10 350	11 657	P32-P35
6 Catenaria	Desde Avenida Las Vegas (carrera 48) con calle 19A hasta Av Oriental (calle 57B) con carrera 48	1 795	m	11 658	13 452	P35-P43
7 Batería	Desde Av Oriental (calle 57B) con carrera 48 hasta calle 44 con carrera 65	4 102	m	13 453	17 554	P43-P48
8 Catenaria	Desde calle 44 con carrera 65 hasta calle 45 con carrera 79A	3 383	m	17 555	20 937	P48-P1

### 3.4 CÁLCULOS CONSUMOS ENERGÉTICOS

#### 3.4.1 CÁLCULOS DE CONSUMOS ENERGÉTICOS PARA UN BUS

Luego de concluir las simulaciones en OpenTrack, el programa entregó varios datos de salida como se presenta en el Anexo 2.

El programa arrojó, entre sus resultados, el consumo de energía segundo a segundo para un bus en su recorrido completo. Tras analizar el consumo de un bus se apreció que la energía permanecía constante cuando el esfuerzo de tracción era negativo, es decir, cuando el motor estaba funcionando como generador (frenado regenerativo), no se presentaba disminución en el consumo energético. Sin embargo, este efecto debe considerarse para el cálculo de la energía total consumida por el bus, por lo que se procedió a efectuar nuevamente el cálculo teniendo en cuenta la regeneración.

Para dicho cálculo se analizó la potencia eléctrica, a partir de la mecánica, considerando eficiencias en el motor y en el inversor. En la Figura 20, se presenta la configuración para un trolebús con batería de respaldo.

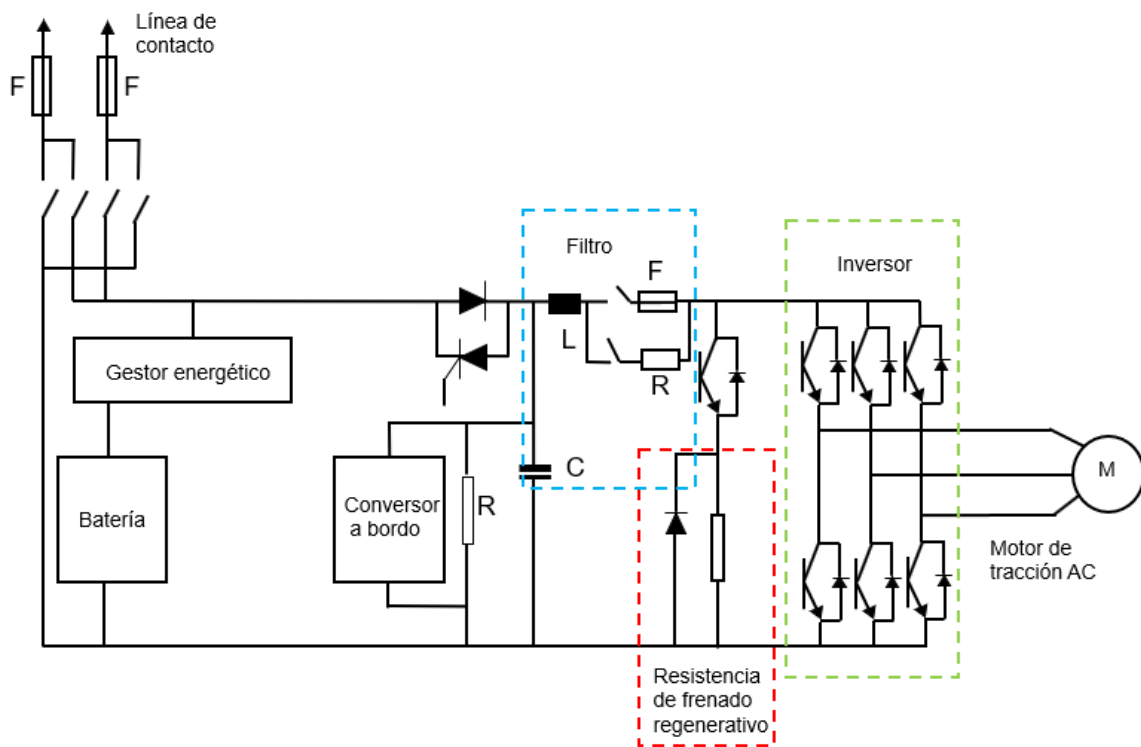


Figura 20. Esquema de circuito de potencia para trolebús con batería de respaldo [61].

Para el caso del motor se encontró que los valores de eficiencia varían entre el 85% y el 95% [62]. Con el fin de utilizar un dato conservador, se optó por tomar una eficiencia del motor del 90%. En los inversores, las eficiencias han mejorado notablemente gracias al uso de dispositivos semiconductores con menores pérdidas, obteniendo eficiencias en los inversores de cerca de 96% [63]. En [3] se menciona que la eficiencia máxima del conjunto motor asíncrono e inversor es del 90,7%, con lo que se puede concluir que la eficiencia del conjunto motor-inversor para el estudio es correcta, toda vez que es del 86,4%, y se encuentra dentro de los valores esperados.

En el Anexo 2, se presentan también los cálculos de energía consumida para un vehículo, con el fin de calcular la energía total de un trolebús y de la flota completa en el día de operación, teniendo en cuenta los despachos presentados en la Tabla 6.

Con esta información se escribió un código en Matlab con el fin de calcular las energías de la flota considerando los despachos horarios de la ruta y la cantidad de buses. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

En la Figura 21 se puede apreciar la potencia demandada de un bus en un recorrido completo, la posición del bus según los segmentos definidos, el consumo energético del bus en cada segmento y la energía total acumulada de un recorrido. Lo anterior, asumiendo que todos los buses consumirán igual cantidad de energía en el recorrido.

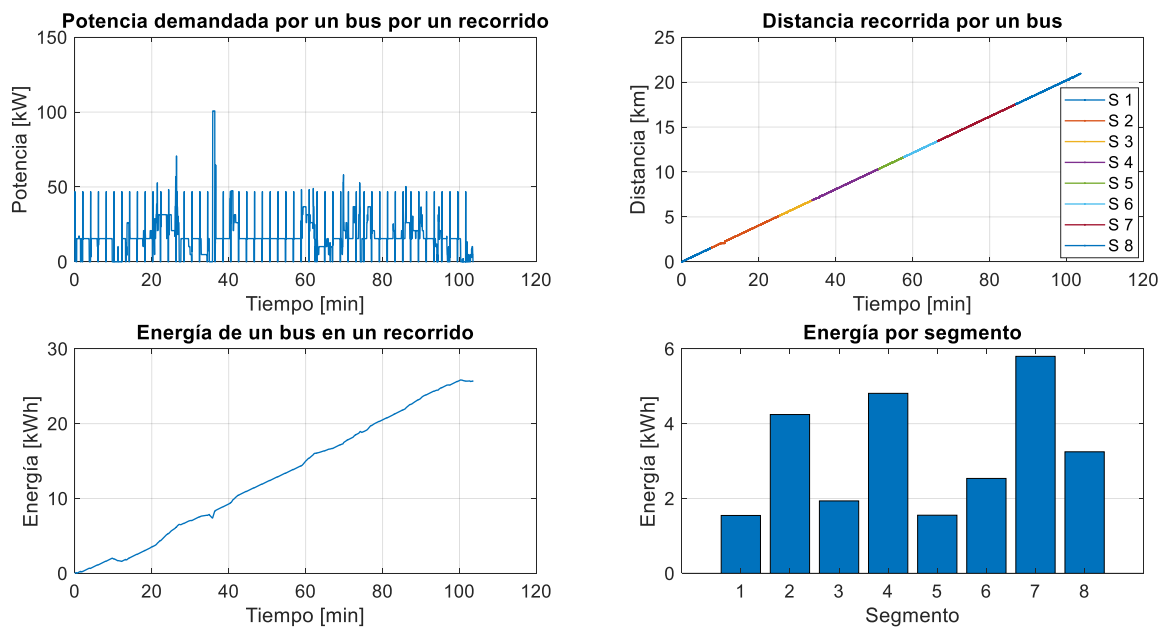


Figura 21. Potencia demandada de un bus por recorrido, consumo energético de un recorrido, posición del bus y consumo energético por segmento en un recorrido completo.

Como puede apreciarse, la energía total que necesita un bus para todo su recorrido, considerando el frenado regenerativo, es de 25,68 kWh, para un recorrido de 20,937 km. Esto significa que el consumo promedio es de 1,23 kWh/km, valor similar a los consumos reportados en varios estudios de buses padrón (12 metros) [64].

Conociendo los consumos energéticos de los segmentos y teniendo en cuenta los casos descritos en la Tabla 9, se realizó la selección y dimensionamiento de las baterías y las subestaciones de tracción, los cuales se describirán en próximas secciones.

### 3.4.2 CÁLCULOS DE CONSUMOS ENERGÉTICOS LA FLOTA COMPLETA

Con base en los cálculos energéticos para un bus padrón, se efectuó el cálculo para el consumo de todos los buses eléctricos duales en un día completo, teniendo en cuenta la cantidad de despachos que se realizan al día y la cantidad de buses disponibles en la flota. En la Figura 22 se puede apreciar el despacho del primer y del último bus de la flota.

En el Anexo 3 se presenta el despacho completo de los 63 buses.

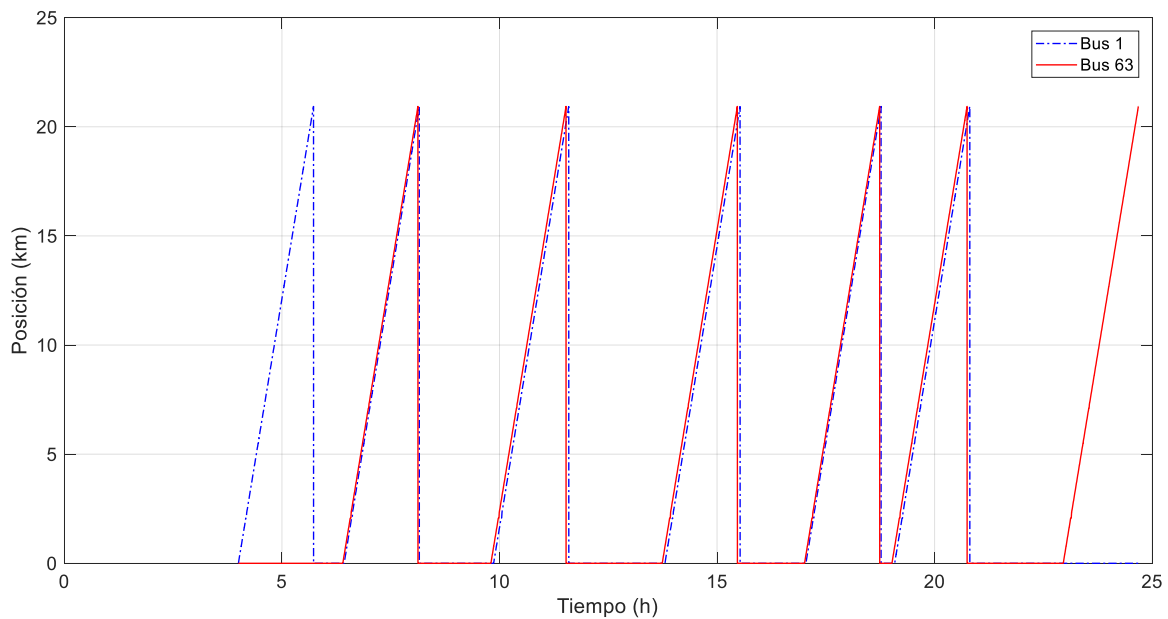


Figura 22. Posición de los buses 1 y 63 en el transcurso del día.

Teniendo el despacho y el consumo energético de un bus, se realizaron varios cálculos de vital importancia para el estudio. En un principio, se encontró la curva de potencia total necesaria para la tracción de todos los buses, según los casos de análisis, como se presenta en la Figura 23.

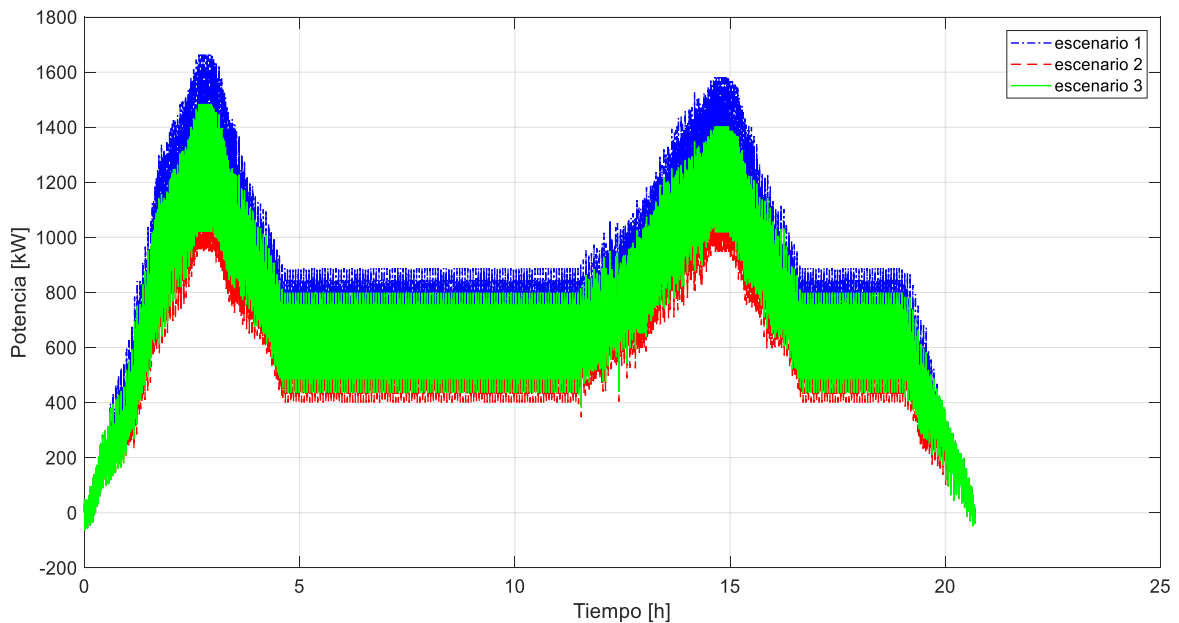


Figura 23. Potencia instantánea de la flota en un día completo.

En la Figura 23 se puede apreciar que en el despacho hay dos picos en las potencias, que corresponden a un elevado flujo de personas transportándose a sus lugares de trabajo en la mañana y retornando a sus viviendas en la tarde. En estos horarios se necesita mayor cantidad de vehículos prestando el servicio, con el fin de poder atender la demanda. Sin embargo, con la información presentada en este tipo de gráfica no se puede efectuar el dimensionamiento de las subestaciones de tracción, pues ésta no tiene en cuenta la ubicación de las catenarias, y, en consecuencia, fue necesario llevar a cabo otros análisis.

Otra información relevante para el estudio es la que se presenta en la gráfica del consumo de energía total de la flota en un día completo. Este valor se presenta en la Figura 24 y con este dato se pueden calcular los costos de energía por la operación de los buses.

Esta figura considera tanto el consumo energético necesario para la tracción de los trolebuses, como el consumo energético para la carga de las baterías en las catenarias y, en consecuencia, se presenta la energía consumida por la flota para los tres casos de estudio. Los datos presentados en estas gráficas hablan sobre consumos y potencias totales de la flota, sin embargo, como se había mencionado en la sección 2.4, la ruta fue caracterizada en ocho (8) segmentos, unos utilizando catenarias como fuente de alimentación de los trolebuses y otros utilizando la batería para alimentar el vehículo. Ante dicha segmentación del recorrido se hizo necesario calcular los consumos para cada segmento y los resultados se presentan en las siguientes figuras.

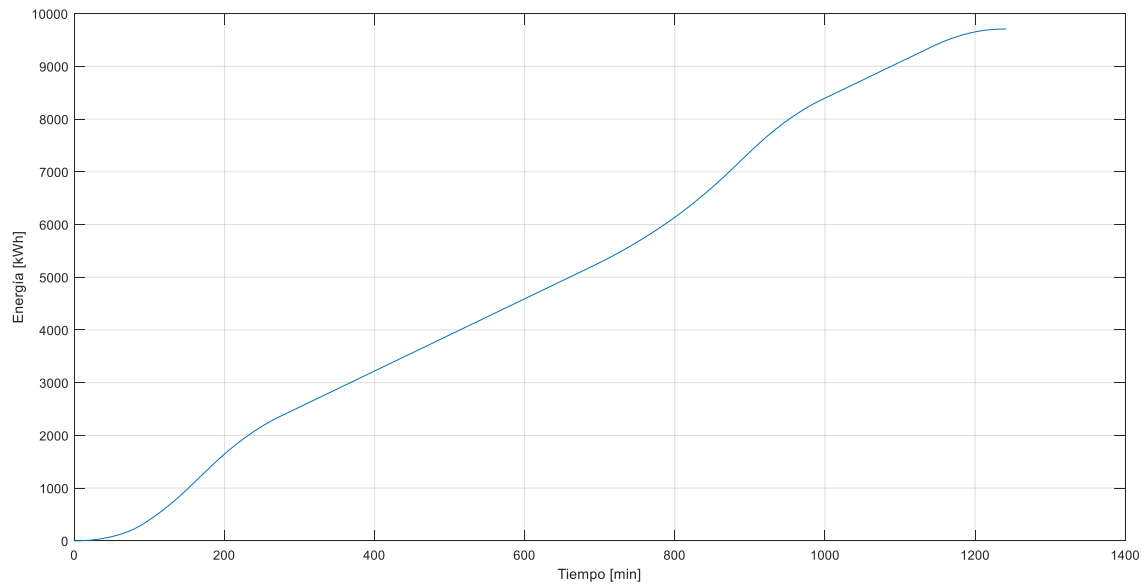


Figura 24. Energía total consumida por la flota en un día completo de operación.

Analizando la ruta con los segmentos se pueden dimensionar las subestaciones que alimentarán las catenarias con la potencia necesaria para cada una. En la Figura 25 se presenta la potencia por segmento y en la Figura 26 se presenta la energía total por segmento, donde se diferencian en rojo los segmentos electrificados para cada caso.

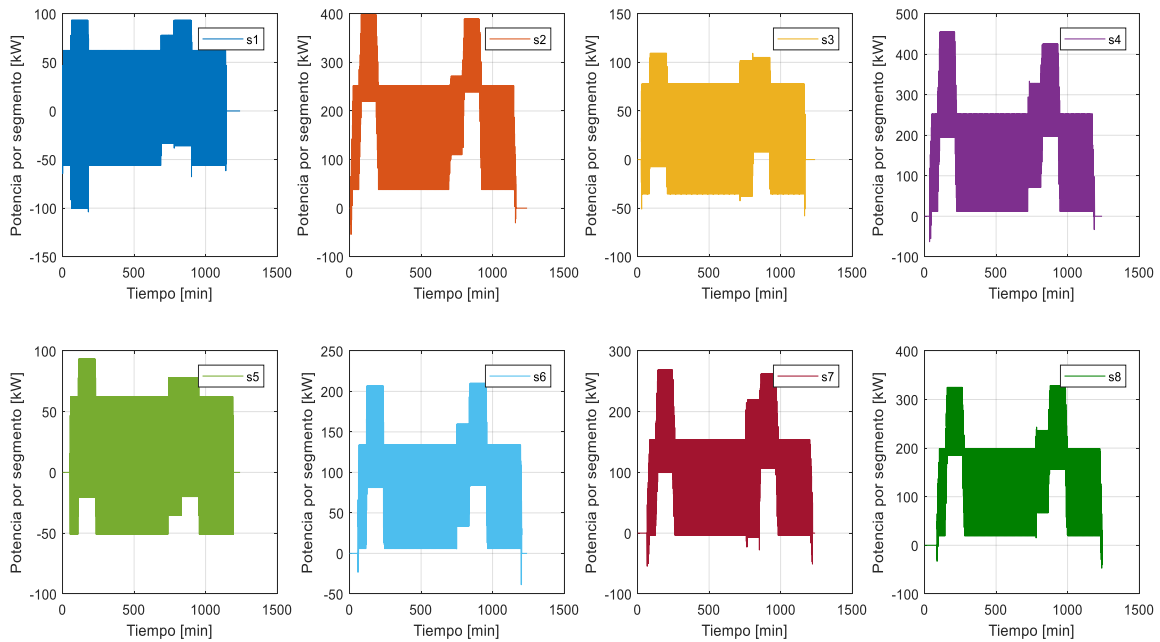


Figura 25. Potencia por segmento.

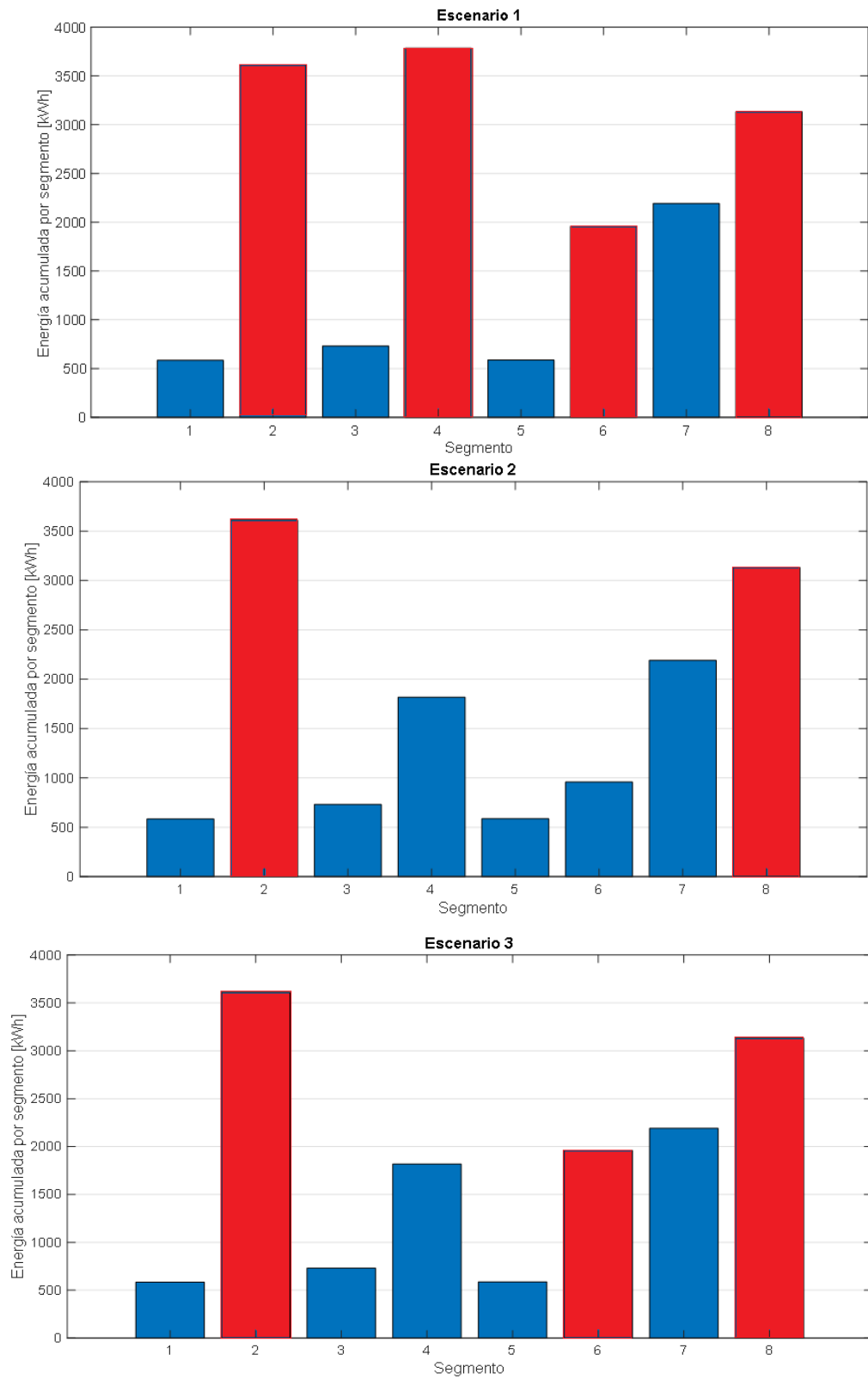


Figura 26. Consumo energético por segmento para todos los casos.

### 3.5 DIMENSIONAMIENTO DE LAS SUBESTACIONES

Para la implementación de las subestaciones de tracción, se partió de la existencia de una red de distribución en la ciudad a 13,2 kV en lugares cercanos a la subestación que alimentaría las catenarias propias del recorrido. De estas redes, pertenecientes al operador de red, se alimentarían las subestaciones de tracción propias del proyecto.

Sin embargo, las subestaciones de tracción no se dimensionaron con la máxima potencia, en especial porque los transformadores pueden y tienden a sobrecargarse por encima de su capacidad nominal durante ciertos periodos de tiempo, sin disminuir su vida útil o dañar sus capacidades operativas. Por este motivo fue necesario elaborar la curva de duración de potencias, con el fin de seleccionar una potencia adecuada y poder calcular una sobrecarga aceptable para las subestaciones de tracción. La curva de duración cuantifica el tipo de ocurrencia o la frecuencia acumulada en unidades de tiempo de la potencia, tal como se presenta en la Figura 27.

Para el análisis se tomó la subestación de mayor potencia, que en este caso sería la ubicada en el segmento 4, debido a que todas las demás subestaciones de tracción se dimensionaron de igual capacidad para facilidad de costos y de diseño. Luego de analizar la gráfica de la Figura 27, se decidió seleccionar una potencia para las subestaciones de 300 kW, en vista de que, como se había mencionado anteriormente, los transformadores e inversores propios de estos tipos de subestaciones se pueden sobrecargar según normas, sin afectar la vida útil de los equipos.

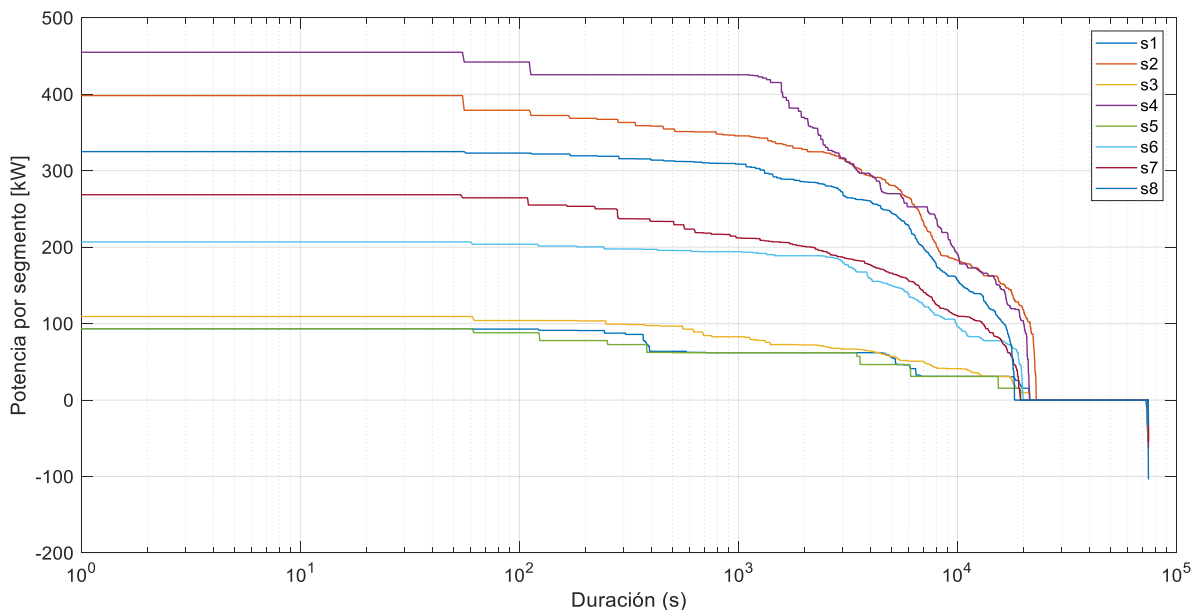


Figura 27. Curva de duración por segmentos con carga de baterías en las catenarias.



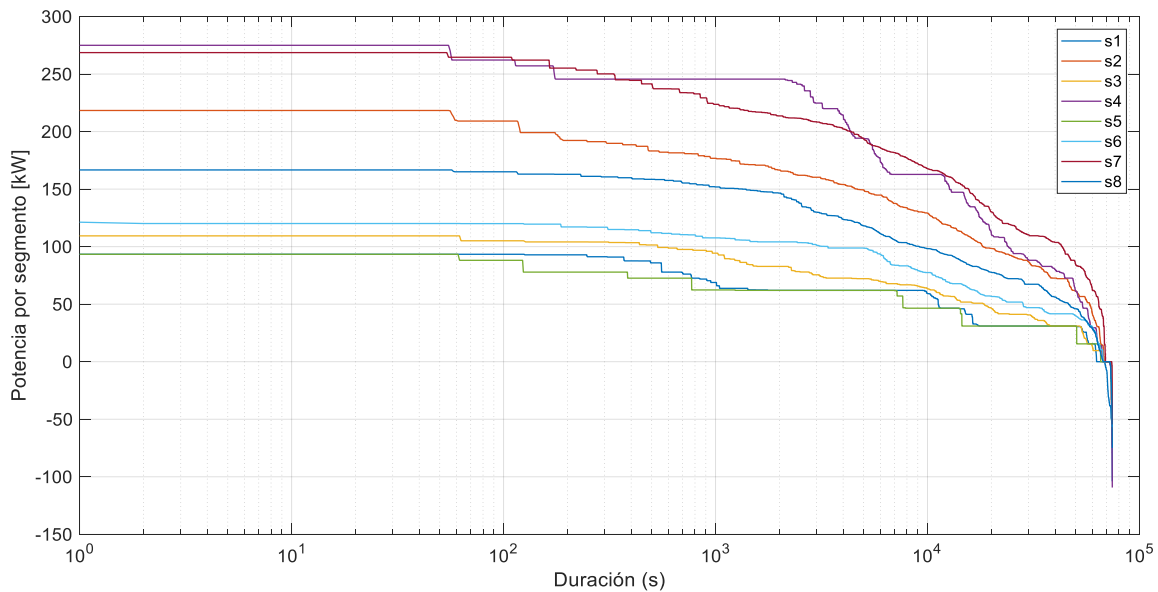


Figura 28. Curva de duración por segmentos sin carga de baterías en las catenarias.

La norma EN 50328 clasifica las subestaciones en diferentes clases de servicio, como consta en la Tabla 11, dependiendo de la sobrecarga y el tiempo de dicha sobrecarga. Para este caso de estudio, se seleccionó una subestación de tracción de 300 kW, clase VI, que soporta una sobrecarga de 1,5 p.u. de manera continua durante 2 horas, debido a que la máxima potencia de la subestación es de 455 kW. Además, la sobrecarga (301-455 kW) tiene una duración de 7223 segundos, lo cual equivale a 2 horas y, por lo tanto, la clasificación seleccionada cumple con estos parámetros.

Tabla 11. Clasificación de subestaciones según norma EN 50328 de 2003.

Clase de servicio	Capacidades de corriente para convertidores (Referido a la corriente base, en p.u)	Aplicaciones típicas	Notas
I	a) 1,0 por unidad de manera continua	Convertidores de frecuencia para líneas férreas principales	
V	a) 1,0 por unidad de manera continua b) 1,5 por unidad de manera continua, 2 horas después de a) c) 2,0 por unidad de manera continua, 1 minuto después de a)	Transito rápido de masas Trolebuses	
VI	a) 1,0 por unidad de manera continua b) 1,5 por unidad de manera continua, 2 horas después de a) c) 3,0 por unidad de manera continua, a 1 minuto después de a)	Líneas férreas principales Transito rápido de masas Sistemas de ferrocarril ligero	

EN 50328: 2003 Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Convertidores electrónicos de potencia para subestaciones.

Debe precisarse que esta gráfica incluye el hecho de que la catenaria entrega la energía necesaria para la tracción del trolebús y además entrega una energía adicional para cargar la batería. La potencia necesaria para cargar las baterías se calculó teniendo en cuenta la

capacidad de las celdas de 30 Ah [3], la tasa de carga (C-Rate) de 1C y el voltaje de la catenaria de 600V, con lo cual se obtuvo una potencia de carga de 18 kW.

Inicialmente no se consideró dentro de los cálculos el hecho de que las catenarias iban a realizar la carga de las baterías, y, en consecuencia, la potencia de las subestaciones de tracción era mucho menor, como se muestra en la Figura 28. Estas subestaciones se habían concebido inicialmente de 200 kW, un valor mucho menor al seleccionado para las subestaciones. Sin embargo, si no se efectuara carga de las baterías en las catenarias, éstas tendrían que ser de mayor tamaño, disminuyendo la cantidad de personas a transportar y, por lo tanto, se necesitarían más buses a corto plazo por el aumento de los usuarios de la flota. Adicionalmente, no incluir esta posibilidad implica desaprovechar una de las ventajas de este tipo de tecnología de batería, la cual permite cargas relativamente rápidas, en comparación con otras tecnologías.

### 3.6 FRENADO REGENERATIVO LOGRADO

Un punto interesante de análisis en este caso de estudio es determinar la cantidad de energía que se logra recuperar con el frenado regenerativo propio de los vehículos eléctricos. Como se aprecia en la Figura 29, la energía total que se genera y recupera en los 6 recorridos que completa el bus en un día de operación es de 14,79 kWh. Ello implica que en un recorrido logra generar 2,465 kWh, lo cual equivale al 8,75% de la energía requerida para en un recorrido de la ruta.

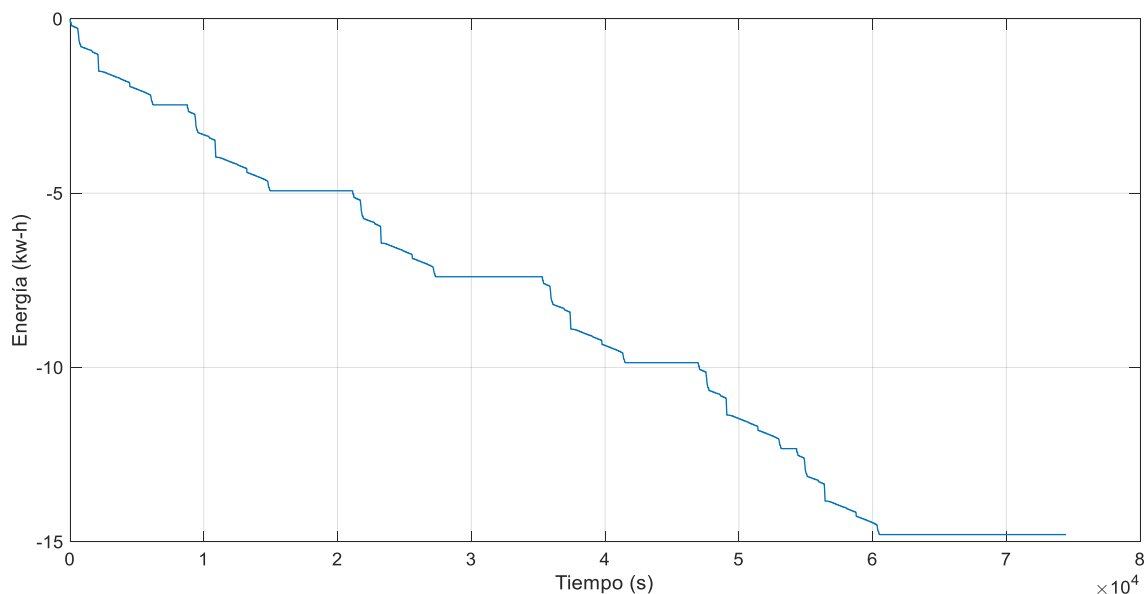


Figura 29. Energía recuperada con el frenado regenerativo para un bus.

Este frenado regenerativo fue considerado únicamente para la recarga de las baterías, con el fin de analizar cómo varía su estado de carga y poder efectuar una comparación de este punto en particular con el trabajo de grado de Restrepo [28]. Finalmente, se debe aclarar que en el caso de que la batería esté totalmente cargada, se podría entregar la energía sobrante del frenado a la catenaria, para alimentar el arranque de un bus que se encuentre conectado en el mismo segmento.

### 3.7 SELECCIÓN DE LAS BATERÍAS

Uno de los retos de análisis más complejos de la investigación consistió en determinar el consumo energético de las baterías, pues se deben considerar muchos aspectos con el fin de que las baterías tengan una capacidad razonable para que no sean tan costosas.

Inicialmente se planteó dimensionar las baterías teniendo en cuenta el consumo energético completo de la flota. Posteriormente, se consideró dimensionarlas según los tres casos de estudio, calculando los consumos energéticos en los tramos a batería en cada caso, teniendo en cuenta los 6 recorridos completos del vehículo y un factor del doble del tamaño, como se presenta en la Tabla 12. Sin embargo, en ambos casos, las baterías necesarias eran de grandes dimensiones (tanto en energía como en peso), el estado de carga no variaba notablemente y suponían un costo elevado. Por todos estos motivos se decidió modificar el criterio de selección, dimensionando una sola capacidad energética de la batería, igual para los 3 casos de estudio, con el consumo de dos recorridos completos. Este criterio es conservador, con el fin de garantizar que, en caso de daño en la infraestructura de las catenarias, los buses puedan terminar sus recorridos y no se queden varados por falta de alimentación (otra característica fundamental de esta tecnología, la cual es muy flexible).

*Tabla 12. Selección de batería para casos realizados.*

<b>Caso</b>	<b>Energía (kWh)</b>	<b>Batería (kWh)</b>
<b>Caso 1</b>	10,83	130,01
<b>Caso 2</b>	18,18	218,16
<b>Caso 3</b>	12,38	148,58

Otro factor que influyó en considerar la misma batería para todos los casos de estudio es que permite realizar comparaciones entre los estados de carga para la batería según las zonas electrificadas.

Finalmente, como aspecto importante para la selección y dimensionamiento de la batería debe mencionarse el factor de envejecimiento, en vista de que el rango operativo de las

baterías, al final de su vida útil, puede disminuir al 80% de su capacidad inicial y, por lo tanto, resultó necesario sobredimensionar la batería teniendo en cuenta este factor.

Considerando todos estos aspectos, la batería seleccionada fue de 64,2 kWh  $\approx$  65 kWh.

Tabla 13. Selección de batería.

Caso	Energía de 2 trayectos(kWh)	Factor de envejecimiento	Batería (kWh)
Casos 1, 2 y 3	51,36	1,25	64,2

### 3.8 ESTADO DE CARGA DE LAS BATERÍAS

Una vez seleccionada la batería más adecuada, se analizó su estado de carga para los 3 casos de estudio. A continuación se describe el modelo de SoC que se utilizó según una simplificación del modelo la referencia [65]

$$SoC(t) = SoC(t - 1) - \frac{P(t) \times \Delta t}{CAP} \quad Ec. 10$$

Donde:

$SoC(t)$ : Estado de carga en un instante determinado.

$CAP$ : Capacidad total de la batería.

$P(t)$ : Potencia instantánea.

$\Delta t$ : Tiempo

Para este análisis se determinó un estado de carga inicial diferente para cada caso, dependiendo de la carga en las catenarias para los tres escenarios de estudio.

Como se puede apreciar en la Figura 30, los cuatro segmentos electrificados del Caso 1 cargan excesivamente la batería, de forma que el estado de carga final es mayor al estado de carga inicial. Con el fin de evitar la carga completa de la batería, se consideró un estado inicial del 40%; sin embargo, el estado de carga final de la batería fue del 98,81%, lo cual implica que no es necesaria una carga nocturna de la batería. En caso de implementación se este sistema, sería necesario aclarar que los trolebuses no siempre deberían conectarse a los segmentos electrificados, sino que se deberían conectar dependiendo del estado de carga de la batería.

Para el segundo caso, que cuenta únicamente con dos segmentos electrificados, se partió de un estado de carga inicial del 90%, toda vez que, en un escenario con carga inicial del

80%, la batería se descargaba por completo. Las 2 catenarias no son capaces de cargar la batería por completo y ésta llega a un estado de carga final del 16,76%, lo cual implica un tiempo de carga nocturna mucho mayor.

En el escenario 3, donde se proponen 3 zonas electrificadas, se consideró un estado de carga inicial del 80% y la carga final obtenida fue del 55,2%. Según los resultados, este es el mejor escenario, puesto que el estado de carga ideal de las baterías de Litio Ferrofosfato está entre el 40% y el 90% de la capacidad de la batería. Además, el tiempo y energía necesaria para la carga nocturna es mucho menor a los requeridos en el caso 2.

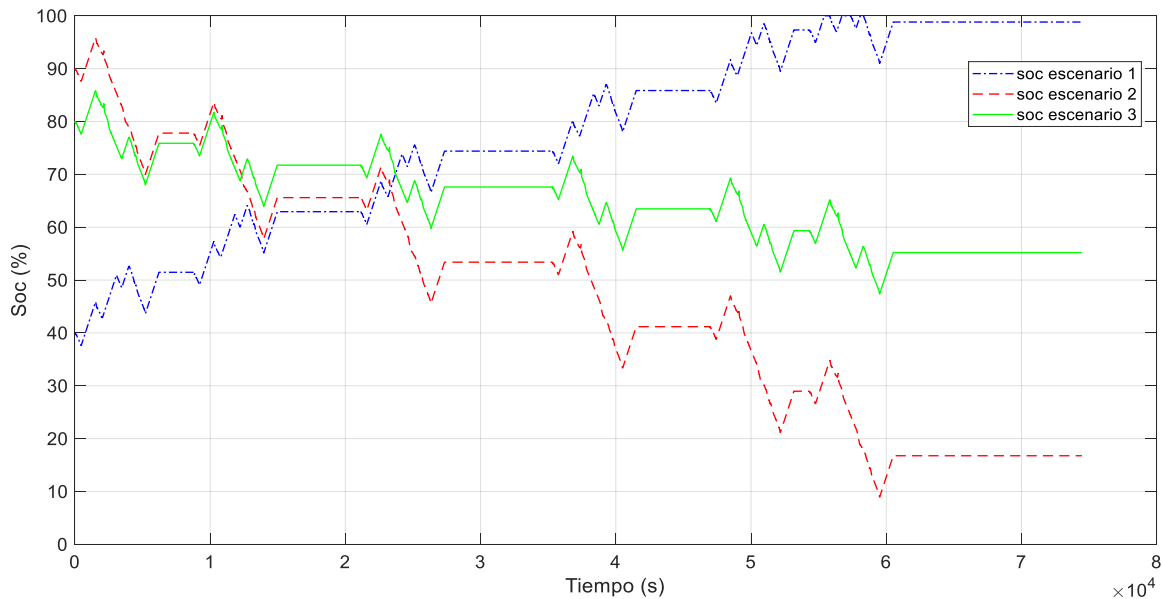


Figura 30. Estado de carga de las baterías para los 3 casos de electrificación.

Finalmente, se analizó cómo sería el estado de carga para las baterías luego de completarse su vida útil, cuando han perdido el 20% de su capacidad. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 31, donde se puede apreciar, que para el escenario 2 resulta inviable, toda vez que la batería llegaría a descargarse por completo durante el recorrido. El estado de carga final para el escenario 3 sería del 49% y para el caso 1 del 98,51%.

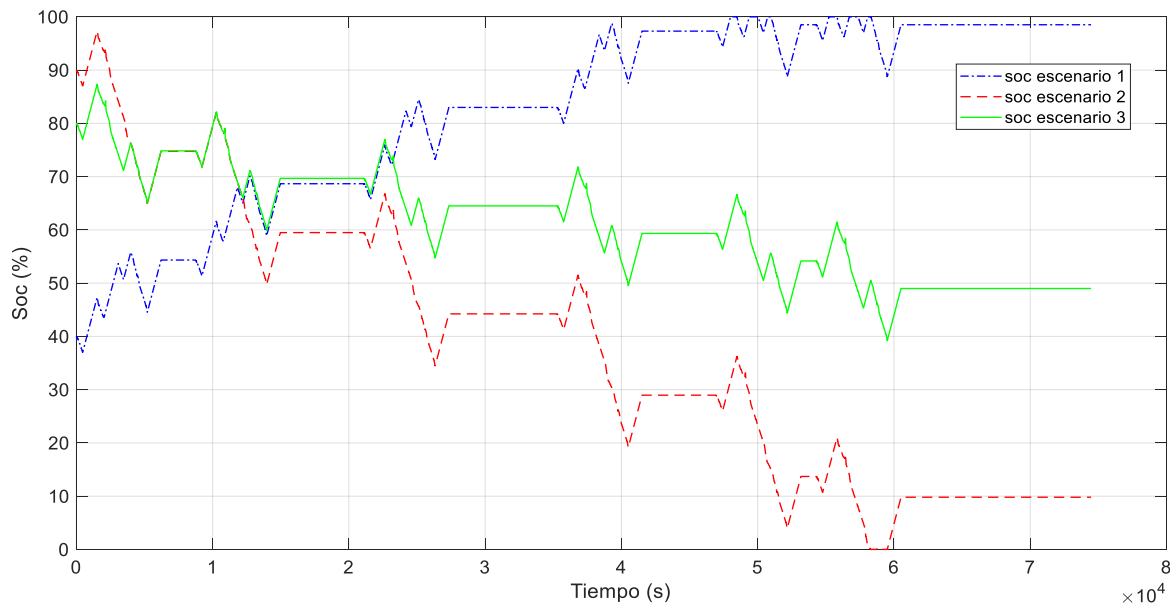


Figura 31. Estado de carga de las baterías con degradación.

### 3.9 SELECCIÓN DE CARGADORES EN PATIO

Los cargadores en patio son necesarios para lograr llevar las baterías al estado de carga inicial planteado para el inicio del recorrido. Tal y como se explicó, para el caso 1 no se necesitan cargadores en el depósito, puesto que la carga final es mayor a la inicial. Para los demás casos si son necesarios. La potencia de los cargadores seleccionados se basó, de conformidad con la referencia [3], en una potencia de carga de 75 kW para cargadores manuales en el depósito.

Con este valor de potencia se calculó el tiempo necesario para llevar las baterías al estado de carga inicial definido previamente, como se presenta en la Figura 32. Se puede apreciar que para el caso 2, en el cual hay que llevar la batería del 16,76% al 90% (cargar 47,61 kWh), se necesitan 2258 segundos (0,63h). Para el caso 3, en el cual el estado de carga final fue de 55,2% y el SoC inicial es de 80%, se necesita cargar 16,12 kWh a cada batería. Además, se tuvo en cuenta las horas de finalización del recorrido de los buses y la hora de inicio de operación de la flota, con el fin de calcular el tiempo total disponible para cargar las baterías en patio. Para esta parte se asumió un tiempo completo de 7,19 h, pues el primer bus inicia su recorrido a las 4 am y finaliza a las 20:48 pm.

Con esta información se procedió a calcular la cantidad de cargadores necesarios para cada caso, multiplicando el tiempo de carga por la cantidad de buses y dividiendo por el tiempo disponible para carga nocturna. Siguiendo este procedimiento se obtuvo que para el caso 2 serían necesarios 6 cargadores y para el caso 3 serían necesarios 2 cargadores. Estos puntos son fundamentales para tener en cuenta la inversión inicial del proyecto, en el análisis de costos de la siguiente sección.

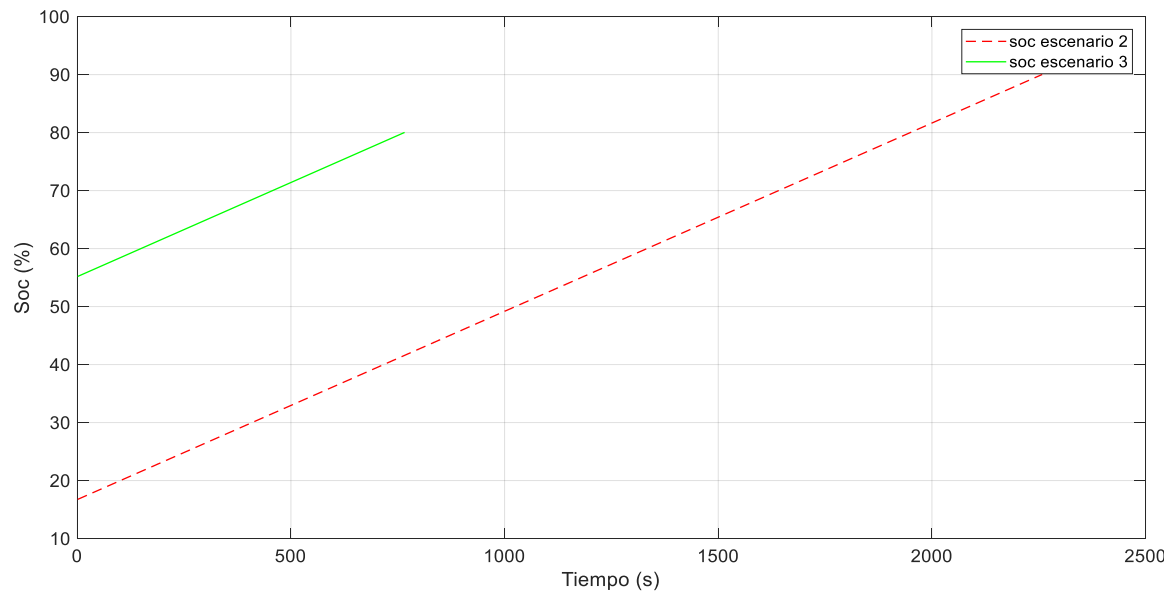


Figura 32. Tiempo de carga de las baterías en patio, al final del recorrido.

## 4 ANÁLISIS DE COSTOS

Las tecnologías de transporte eléctrico son confiables y amigables con el medio ambiente, por lo cual en los últimos años se ha venido investigando ampliamente sobre ellas. Los fabricantes de buses eléctricos han optado por implementar tecnologías emergentes para la tracción eléctrica, e.gr. motores de imán permanente o baterías de litio, con el propósito de hacer a estos vehículos más atractivos en el mercado. Sin embargo, la gran barrera en el uso de estas tecnologías es la preconcepción de que los costos de inversión son altos [66].

Para efectuar una verdadera comparación entre diferentes tecnologías de buses, se deben tener en cuenta muchos factores en un marco de análisis financiero que incluye los costos de inversión, operación y mantenimiento, los ingresos operativos, los esquemas de financiación, y la reposición de activos, entre otros. Este tipo de comparación no hace parte del alcance de este estudio, pero podría proponerse como un trabajo a futuro. Si bien es cierto que la inversión inicial de la tecnología de tracción es más elevada que la de buses diésel, se debe considerar que otros factores como la volatilidad del precio del petróleo o la escasez de gas en Colombia pueden incrementar sus costos operativos, a diferencia de lo que sucede con la energía eléctrica en Colombia, cuyo comportamiento tiende a ser más estable gracias al elevado porcentaje de generación hidroeléctrica en el país [66].

Como se mencionó anteriormente, dentro del alcance del proyecto no se encuentra contemplado un análisis financiero completo, sino una estimación general de costos para la tecnología de buses duales con baterías litio ferrofosfato como fuente de respaldo. Adicionalmente, y a manera de referencia, también se presenta el comparativo con los buses a batería con tecnología litio titanato, conforme con el estudio de Restrepo [28].

A continuación, se describen los factores a considerar para elaborar una estimación general de los costos que implicarían la elección de estos dos tipos de tecnologías:

- Costos energéticos: para este análisis, los costos considerados son los de energía eléctrica (\$/kWh), como la fuente de alimentación de los buses duales y la fuente para la carga de las baterías.
- Costos salariales de operación: son los costos asociados a la operación de los vehículos, que para este caso es el valor salarial por pagar a los conductores, considerando un factor por prestación de servicios y todo esto multiplicado por la cantidad de vehículos de la flota.
- Costos salariales de administración: son aquellos referentes al pago del personal que pertenece a la entidad administrativa de las empresas de transporte. Su cálculo se efectúa estimando cuantas personas del área administrativa se necesitan por bus y, al igual que en los salarios operativos, llevan implícito un factor de prestaciones.



- Inversiones: es el monto inicial que el transportador o inversionista de la flota debe invertir para suministrar, instalar, probar y poner en servicio los equipos e infraestructura del proyecto.
- Costos administrativos: son aquellos que se deben pagar por el hecho de circular en la ciudad, tales como: el seguro obligatorio de accidentes, el seguro de daños y responsabilidad civil, el impuesto de rodamiento de vehículos, entre otros.

Para el análisis de costos de inversión debe considerarse los costos del material rodante y la infraestructura eléctrica, incluyendo subestaciones de tracción, catenarias y cargadores. Se calculan los costos totales de inversión como la suma de cada uno de estos componentes para los tres casos descritos anteriormente.

En la Tabla 14 se resumen los casos de análisis con diferentes porcentajes de electrificación, y se especifica el número de cargadores de oportunidad equivalentes para cada zona, como se analiza en detalle en el trabajo de grado de Restrepo [28].

*Tabla 14. Casos de análisis de infraestructura.*

<b>Infraestructura</b>	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>	<b>Caso 3</b>
Cargadores en ruta/ Electrificación de sectores	4	2	3

Además, en la Tabla 15, se presenta un resumen de las características de cada caso de estudio para la tecnología de bus eléctrico dual.

*Tabla 15. Resumen de los casos de análisis para bus eléctrico dual.*

<b>Caso</b>	<b>Batería</b>	<b>Segmentos electrificados</b>	<b>Segmentos a batería</b>	<b>Cargadores en patio</b>
Caso 1	65 kWh	S2, S4, S6, S8	S1, S3, S5, S7	0
Caso 2	65 kWh	S2, S8	S1, S3, S4, S5, S6, S7	6
Caso 3	65 kWh	S2, S6, S8	S1, S3, S4, S5, S7	2

En la Tabla 16 se muestran los costos por unidad que deben ser asumidos por el inversionista que quiera promover el proyecto y sus respectivas referencias. Se hace la aclaración de que el TRM para el cambio a pesos colombianos fue de \$3.097 del día 13 de octubre del 2018. Todos los precios presentados en el estudio están dados en pesos colombianos (COP).

Tabla 16. Costos de inversión [3], [66], [67].

Bus dual		Bus a batería	
Elemento	Precio	Elemento	Precio (COP)
Bus 12 m	\$1.185.723.000	Bus 12 m	\$1.221.654.000
Batería LFP (1kWh)	\$100.427.145	Batería LTO 65 kWh	\$221.873.925
Cargador 75 kW en patio	\$125.758.500	Cargadores en ruta 150kW	\$538.965.000
Subestación tracción 300 kW	\$1.084.125.000	Cargadores en patio 75 kW	\$125.758.500
Catenaria (/km)	\$1.245.814.500	Cargadores en ruta 200kW	\$718.620.000
Costo taller, portal y patio(/bus)	\$180.274.500	Costo taller, portal y patio(/bus)	\$180.274.500

Dentro de los costos operativos, administrativos y de mantenimiento (CAOM) se consideran los costos de los energéticos y los salarios del personal operativo a cargo del manejo de la flota, tanto de los conductores como del personal administrativo necesario para dirigir los buses. Para el mantenimiento se debe tener en cuenta tanto el mantenimiento de los vehículos como la infraestructura. Hacen parte del mantenimiento: las revisiones, cambios de repuestos, limpieza, etc. Se asume un valor del 5% de la inversión inicial para el mantenimiento.

El salario se calcula dependiendo del personal por bus, la cantidad de buses de la flota y las prestaciones sociales que debe asumir el empleador. Todos estos datos se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17. Costos Operativos [66].

<b>Número de buses</b>	63
<b>Número de conductores</b>	2,50
<b>Personal administrativo por bus</b>	0,05
<b>Prestaciones sociales</b>	1,50
<b>Salario Base Conductor sin prestaciones [COP]</b>	\$1.300.000,0
<b>Salario Base Personal administrativo sin prestaciones [COP]</b>	\$2.600.000,0
<b>Salario Base Conductor con prestaciones [COP]</b>	\$1.950.000,0
<b>Salario Base Personal administrativo con prestaciones [COP]</b>	\$3.900.000,0
<b>Salario estimado total Conductores con prestaciones [COP]</b>	\$307.125.000,0
<b>Salario estimado total Personal administrativo con prestaciones [COP]</b>	\$12.285.000,0
<b>SOAT [COP]/bus*</b>	\$889.300,0

\*Valor actual vigente, consultado en SURA

Adicionalmente, es fundamental hacer referencia a los costos de energía para los casos de estudio. La energía consumida se presenta en la Tabla 18. El valor del kWh, se toma de los datos de EPM, para un usuario no residencial, en nivel II, del precio de la energía al mes de septiembre del 2018 [68] considerando la flota por un mes de operación.

Tabla 18. Costos energéticos mensuales [68].

Energía total de la flota [kWh]	Días de operación	Precio de energía COP/kWh	Valor total COP
9.707	30	\$ 492,26	\$ 143.351.035

Para llevar a cabo una mejor comparación entre alternativas, se toman los casos de la Tabla 14 y se comparan los valores. Con el objetivo de obtener un costo estimado más cercano a la realidad, en cada uno de los casos anteriormente mencionados se consideran las siguientes variables:

- Tipo de bus.
- Tipo de tecnología para la batería.
- Subestaciones de tracción y catenaria.
- Los cargadores que van en el parqueadero o patio.

En las Tablas 19 a 24 se presentan los costos de inversión para los tres casos de estudio, tanto de buses a batería como buses duales.

Tabla 19. Costos para el caso 1 Bus a batería.

Caso 1				
Elemento	Cantidad	Costo unidad [USD]	Costo Total [USD]	Costo Total [COP]
Bus 12 m	63	\$ 394.400	\$ 24.847.200	\$ 76.964.202.000
Batería LTO 65 kWh	63	\$ 71.630	\$ 4.512.690	\$ 13.978.057.275
Cargadores en ruta de 150 kW	4	\$ 174.000	\$ 696.000	\$ 2.155.860.000
Cargadores en patio 75 kW	0	\$ -	\$ -	\$ -
Costo taller, portal y patio por bus	63	\$ 58.200	\$ 3.666.600	\$ 11.357.293.500
<b>Costos Totales [USD], [COP]</b>			<b>\$ 33.722.490</b>	<b>\$ 104.455.412.775</b>

Tabla 20. Costos para el caso 2 Bus a batería.

Caso 2				
Elemento	Cantidad	Costo unidad [USD]	Costo Total [USD]	Costo Total [COP]
Bus 12 m	63	\$ 394.400	\$ 24.847.200	\$ 76.964.202.000
Batería LTO 65 kWh	63	\$ 71.630	\$ 4.512.690	\$ 13.978.057.275
Cargadores en ruta de 200 kW	2	\$ 232.000	\$ 464.000	\$ 1.437.240.000
Cargadores en patio 75 kW	6	\$ 40.600	\$ 243.600	\$ 754.551.000
Costo taller, portal y patio por bus	63	\$ 58.200	\$ 3.666.600	\$ 11.357.293.500
<b>Costos Totales [USD], [COP]</b>			<b>\$ 33.734.090</b>	<b>\$ 104.491.343.775</b>

Tabla 21. Costos para el caso 3 Bus a batería.

Caso 3				
Elemento	Cantidad	Costo unidad [USD]	Costo Total [USD]	Costo Total [COP]
Bus 12 m	63	\$ 394.400	\$ 24.847.200	\$ 76.964.202.000
Batería LTO 65 kWh	63	\$ 71.630	\$ 4.512.690	\$ 13.978.057.275
Cargadores en ruta de 150 kW	3	\$ 174.000	\$ 522.000	\$ 1.616.895.000
Cargadores en patio 75 kW	3	\$ 40.600	\$ 121.800	\$ 377.275.500
Costo taller, portal y patio por bus	63	\$ 58.200	\$ 3.666.600	\$ 11.357.293.500
<b>Costos Totales [USD], [COP]</b>			\$ 33.670.290	\$ 104.293.723.275

Tabla 22. Costos para el caso 1 Bus dual.

Caso 1				
Elemento	Cantidad	Costo unitario [USD]	Costo Total [USD]	Costo Total [COP]
Bus 12 m	63	\$ 382.800	\$ 24.116.400	\$ 74.700.549.000
Batería LFP 65 kWh	63	\$ 32.422	\$ 2.042.586	\$ 6.326.910.135
Cargadores en patio 75 kW	0	\$ 40.600	\$ -	\$ -
Subestación de tracción 300 kW	4	\$ 350.000	\$ 1.400.000	\$ 4.336.500.000
Catenaria	12,245	\$ 402.200	\$ 4.924.939	\$ 15.254.998.553
Costo taller, portal y patio por bus	63	\$ 58.200	\$ 3.666.600	\$ 11.357.293.500
<b>Costos Totales [USD], [COP]</b>			\$ 36.150.525,00	\$ 111.976.251.188

Tabla 23. Costos para el caso 2 Bus dual.

Caso 2				
Elemento	Cantidad	Costo unitario [USD]	Costo Total [USD]	Costo Total [COP]
Bus 12 m	63	\$ 382.800	\$ 24.116.400	\$ 74.700.549.000
Batería LFP 65 kWh	63	\$ 32.422	\$ 2.042.586	\$ 6.326.910.135
Cargadores en patio 75 kW	6	\$ 40.600	\$ 243.600	\$ 754.551.000
Subestación de tracción 300 kW	2	\$ 350.000	\$ 700.000	\$ 2.168.250.000
Catenaria	6,197	\$ 402.200	\$ 2.492.433	\$ 7.720.312.457
Costo taller, portal y patio por bus	63	\$ 58.200	\$ 3.666.600	\$ 11.357.293.500
<b>Costos Totales [USD], [COP]</b>			33.261.619,40	\$ 103.027.866.092

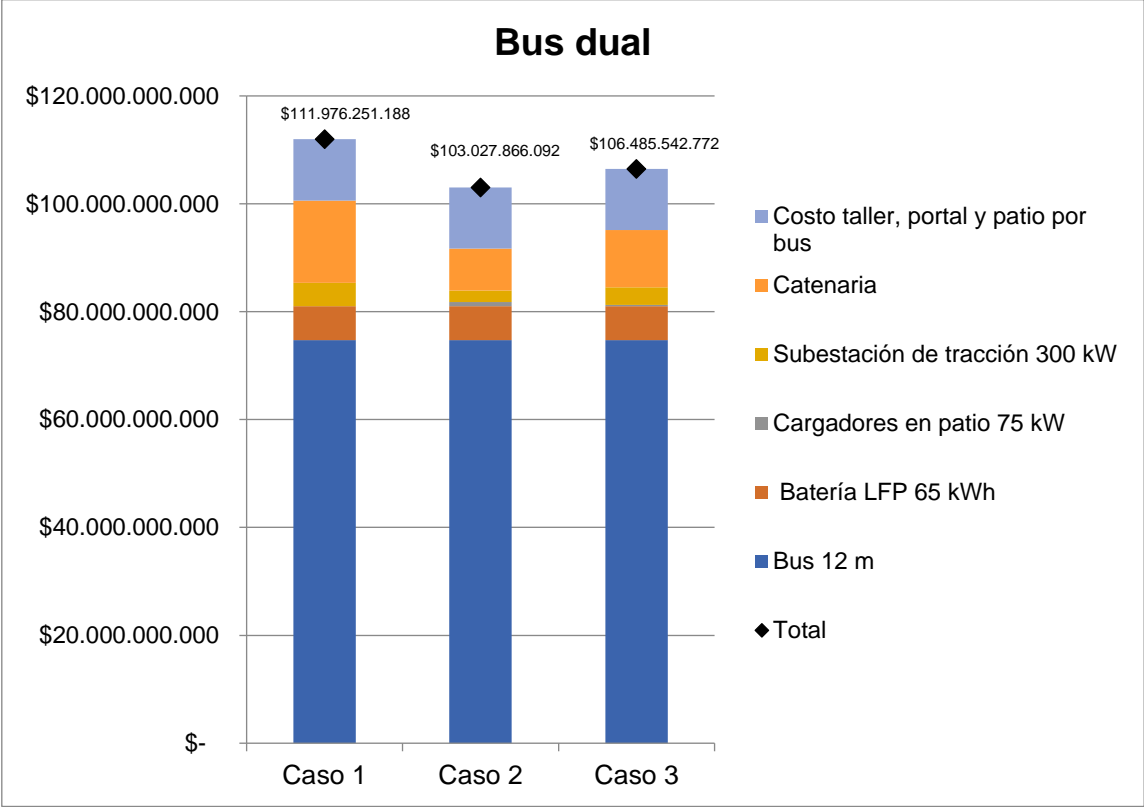
Tabla 24. Costos para el caso 3 Bus dual.

Caso 3				
Elemento	Cantidad	Costo unitario [USD]	Costo Total [USD]	Costo Total [COP]
Bus 12 m	63	\$ 382.800	\$ 24.116.400	\$ 74.700.549.000
Batería LFP 65 kWh	63	\$ 32.422	\$ 2.042.586	\$ 6.326.910.135
Cargadores en patio 75 kW	2	\$ 40.600	\$ 81.200	\$ 251.517.000
Subestación de tracción 300 kW	3	\$ 350.000	\$ 1.050.000	\$ 3.252.375.000
Catenaria	8,506	\$ 402.200	\$ 3.421.113	\$ 10.596.898.137
Costo taller, portal y patio por bus	63	\$ 58.200	\$ 3.666.600	\$ 11.357.293.500
<b>Costos Totales [USD], [COP]</b>			\$ 34.377.899,20	\$ 106.485.542.772

En la Figura 33 se pueden apreciar los componentes de costos de inversión de cada tecnología para cada caso. Para el caso del bus dual, puede determinarse que el valor de la instalación de la catenaria para el caso 1 es mayor, pues comprende cuatro zonas electrificadas. Por su parte, el caso 2 sólo tiene dos zonas y por ende es el menos costoso.

Otro aspecto para resaltar es que, si bien el caso 1 no tiene cargadores en patio, sigue siendo la opción más costosa, toda vez que requiere más catenarias y más subestaciones de tracción. También se puede ver que los precios de los tres casos son similares, pues los principales factores que influyen en el costo son el precio de los buses y de las baterías. Para los tres casos se plantean la misma cantidad de buses con baterías de respaldo de igual capacidad, por lo que presentan valores idénticos en este componente.

Para el caso del bus de batería, los costos totales para cada escenario no varían de manera significativa, puesto que las baterías de litio titanato son mucho más costosas que las de litio ferrofosfato y representan el mayor porcentaje sobre el costo final. Lo único que diferencia los tres escenarios es la cantidad de cargadores, cuyos precios no afectan de manera considerable las diferentes alternativas.



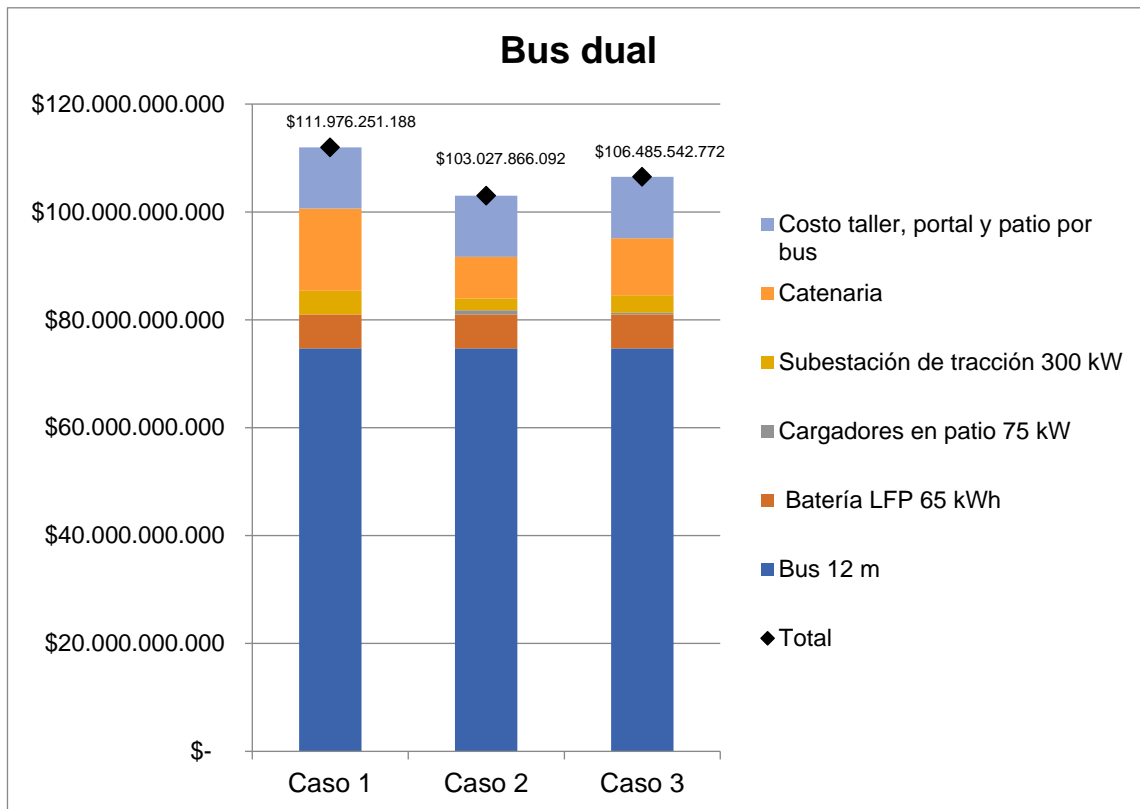


Figura 33. Comparativo de costos en los tres casos de análisis.

Con esta información se procedió a calcular el valor anual equivalente (VAE), es decir, el valor anual que los inversionistas deberían considerar, en un período de 10 años, para cubrir los costos totales del proyecto, con el fin de analizar cuál es la opción menos costosa.

El período seleccionado hace referencia a la vida útil de las baterías, las cuales, luego de ese período de tiempo, deben ser desechadas, pues su capacidad puede haberse reducido al 80%. También se tuvo en cuenta el IPP (índice de precios al productor) que según DANE es de aproximadamente el 3%. Este indicador reporta la variación promedio de los precios de los bienes que se producen en el país para consumo interno y para exportación.

Para hallar el costo total se suman todos los componentes de operación, administración y mantenimiento y se obtiene el OPEX para cada año. Luego, para hallar el valor total se hace la suma de los 10 años de operación y mantenimiento, como se presenta en el Anexo 4.

Luego se procedió con el cálculo del VAE, con el cual se busca hallar una serie uniforme de pagos, teniendo en cuenta los costos iniciales y los costos anuales de operación y mantenimiento. Esto costos deben traerse a valor anual neto con la siguiente ecuación:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{Ft}{(1+i)^t} \quad \text{Ec. 11}$$

donde:

$I_0$ : Inversión inicial.

$F_t$ : Flujos de dinero en cada periodo de tiempo.

$n$ : número de periodos de tiempo.

$i$ : Tipo de interés exigido a la inversión.

La tasa de descuento  $i$  se estableció del 15%. Luego se calculó el valor anual equivalente que debe asumir el inversionista en este periodo con la Ecuación 12.

$$VAE = \frac{VAN \times i}{1 - \frac{1}{(1+i)^n}} \quad \text{Ec. 12}$$

En la Tabla 25 y en la Figura 34 se puede apreciar el VAE para cada caso de estudio y para cada tecnología de bus. Se observa que para buses de batería el valor es muy similar. En el caso de buses duales el caso 1 es el de mayor valor, debido a los segmentos electrificados. Se puede afirmar que para ambas tecnologías la diferencia de costos no es significativa.

Tabla 25. Comparación Valor Anual Equivalente

	Bus a batería	Bus dual
<b>Caso 1</b>	\$33.184.215.441	\$35.112.239.405
<b>Caso 2</b>	\$33.193.426.625	\$32.818.253.022
<b>Caso 3</b>	\$33.142.765.111	\$33.704.654.622

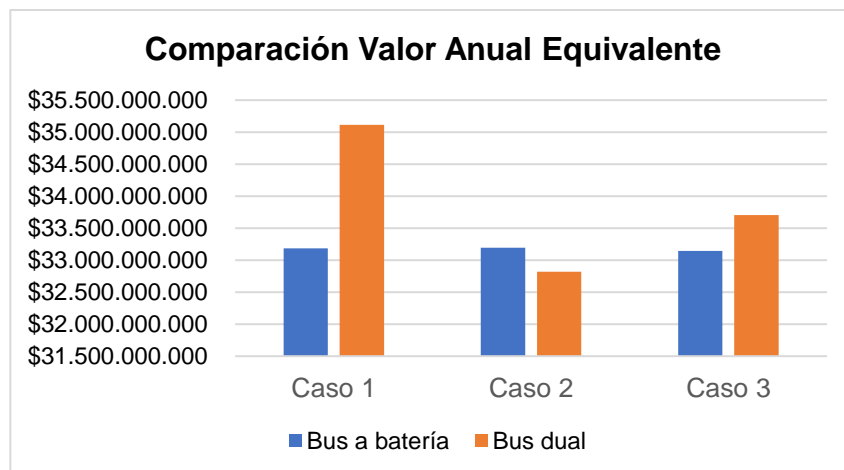


Figura 34. Comparación entre VAE para cada caso de estudio.

Se debe aclarar que dentro de los costos de inversión no se tuvo en cuenta el valor de la acometida de media tensión para ninguna de las dos tecnologías, sin embargo, para el caso de los cargadores de oportunidad la acometida debe ser subterránea lo que implica un costo mucho mayor que para las subestaciones de tracción. También se debe considerar que, los cargadores, al tener potencias elevadas, presentan niveles de cortocircuito mucho mayores, lo cual implica mayores exigencias en los equipos y mayores niveles de aislamiento, lo que incrementa el aporte económico.

Otro aspecto importante para considerar es que los costos de la catenaria han venido disminuyendo considerablemente, pues el uso de menos elementos como suiches, cambiavías, tensores, etc., en segmentos electrificados sólo parcialmente, disminuye el costo por unidad de longitud de la catenaria. Por este motivo se decidió realizar una sensibilidad respecto a los costos del km de catenaria [69].

En la Figura 35, se observa una comparación de los valores anuales equivalentes dependiendo del costo de catenaria por km. De esta figura se puede concluir, que, si las catenarias son más económicas, la solución de buses duales sería mejor opción, en cualquiera de los tres casos de estudio.



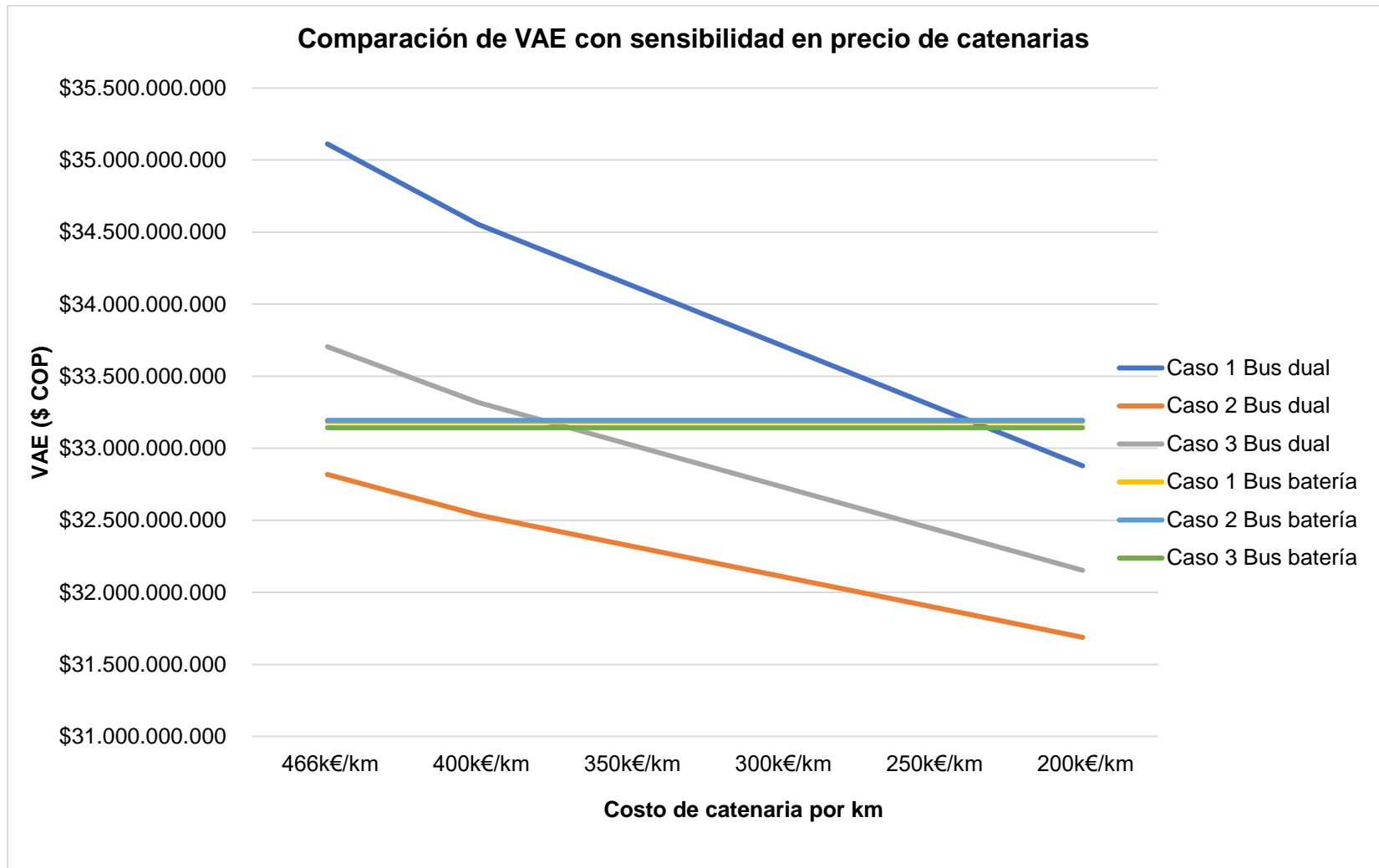


Figura 35. Comparación VAE para ambas tecnologías con sensibilidad del precio de catenaria.

## CONCLUSIONES

Los sistemas de tracción eléctrica, como solución para el transporte público, se han venido implementando y estudiando a lo largo de las últimas décadas. El estudio para los sistemas de autobuses eléctricos tiene una gran complejidad, debido a las múltiples opciones que se tienen para los diseños. Es decir, existen varias alternativas que se pueden acoplar dependiendo de las necesidades y las características de las rutas, además de las necesidades de los inversionistas. En este estudio se analizó una alternativa basada en buses duales con baterías de litio ferrofosfato como fuente de respaldo. Sin embargo, múltiples opciones se podrían haber estudiado para la ruta Circular Sur 302.

La limitación de este estudio es que muchos factores fueron seleccionados a criterio del diseñador, teniendo en cuenta parámetros de otras rutas, datos técnicos de ciertos equipos o criterios normativos. A pesar de estas limitaciones, este trabajo aumentó nuestra comprensión del tema y presenta información base para la posible transición de tecnología de la ruta Circular Sur 302.

Como se pudo apreciar en la vigilancia tecnológica, los buses eléctricos y buses duales no son una solución actual, de hecho, se encuentran implementados en muchas ciudades. También se pudo analizar que las tecnologías de baterías han mejorado considerablemente, en especial su densidad gravimétrica, lo que conlleva a menores pesos para las baterías, factor que se ha esgrimido en el pasado para rechazar la implementación de este tipo de tecnología.

Se estudiaron tres casos en los cuales se planteaba la instalación de catenarias en diferentes zonas de la ruta. De manera paralela se comparó con el trabajo de Restrepo [28], en el cual se plantearon tres casos de estudio ubicando cargadores de diferentes potencias en los segmentos electrificados. En este estudio la selección de las baterías fue idéntica, para poder hacer comparaciones en precios y estados de carga.

Con el estudio se identificó que los tres casos analizados son viables de implementar, sin embargo, el caso 3 tuvo el mejor comportamiento, pues el estado de carga de la batería estuvo dentro de los rangos adecuados para este tipo de tecnología. Además, en términos de precio tuvo un buen comportamiento por requerir sólo dos cargadores para la carga nocturna y tres tramos de catenaria.

La investigación también demostró que para el caso de buses con batería a bordo los costos de inversión son muy similares, pues las baterías, que son el componente más costoso de esta tecnología, fueron dimensionadas de igual capacidad para los 3 casos de estudio y, por ende, el impacto de los demás factores no fue muy relevante en el resultado.

En el caso de los buses eléctricos duales, el escenario de mayor precio fue el 1, a pesar de no contar con cargadores en patio, debido a que éste cuenta con cuatro segmentos electrificados, lo cual aumenta considerablemente su costo por las catenarias y las

subestaciones de tracción necesarias. El segundo caso fue el más económico, debido a que únicamente contaba con dos catenarias y dos subestaciones de tracción; sin embargo, se necesitarían seis cargadores en patio. Por último, en el tercer caso, se obtuvo un precio intermedio y el mejor resultado técnico porque las baterías mantienen un estado de carga regulado.

Como se pudo analizar en el estudio, la construcción de las redes de tracción tiene como desventaja las grandes inversiones iniciales requeridas, por lo cual, al diseñar rutas con buses eléctricos duales, se debe buscar un equilibrio entre los costos y tamaños de las baterías y la longitud mínima de las redes de tracción. Otro hallazgo que surgió en el estudio es que, con la carga de las baterías en las catenarias, la infraestructura de las subestaciones eléctricas aumentó considerablemente; sin embargo, entre mayor electrificación, menor es la batería. Por estos motivos se debe buscar un equilibrio entre ambos aspectos, con el fin de buscar una solución adecuada para la ruta analizada.

Una ventaja operativa de los buses duales es su capacidad de carga en movimiento, con lo cual no se alteran los tiempos de la ruta para realizar las cargas en los paraderos. Por tal motivo, los buses con baterías pueden ser implementados en rutas con paraderos continuos (mayores costos de inversión) o con paraderos con tiempos de espera de pasajeros.

También se pudo observar, para este caso de estudio, que la diferencia de precios entre las tecnologías de buses a batería y buses duales no es muy grande y en consecuencia ambas podrían ser implementadas según el análisis de costos realizado. Sin embargo, si se tiene en cuenta que cada vez se necesitan menos elementos para las catenarias, su costo por unidad de longitud disminuye, haciendo esta tecnología más competitiva que los buses a batería.

## TRABAJOS FUTUROS

En futuros estudios se podría mejorar el modelo realizado teniendo en cuenta los parámetros de consumos de servicios auxiliares, como el aire acondicionado, puesto que la necesidad del aire acondicionado cada vez es mayor incluso en ciudades como Medellín. Tener en cuenta este parámetro podría implicar cambios considerables en los resultados obtenidos pues estos sistemas pueden duplicar los consumos de las rutas.

Otro aspecto para tener en cuenta en trabajos futuros es un análisis financiero completo, donde se tengan en cuenta todos los parámetros necesarios para este tipo de estudio y los ingresos por la operación del sistema, dando como resultado datos más exactos para los inversionistas.

También se podría desarrollar un estudio parametrizado que permita obtener los casos que reduzcan los consumos de energía y minimicen los costos, con un modelo matemático que consideren todos estos factores.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Padrón, “Baterías: estado del arte y vigilancia tecnológica”, Universidad Pontificia Bolivariana, 2013.
- [2] A. E. Díez Restrepo *et al.*, “Análisis de la factibilidad de implementación de una solución de transporte masivo eléctrico de mediana capacidad en la ciudad de Bogotá mediante trolebuses”, Medellín, 2010.
- [3] D. Göhlich, T.-A. Fay, D. Jefferies, E. Lauth, A. Kunitz, y X. Zhang, “Design of urban electric bus systems”, *Des. Sci.*, vol. 4, 2018.
- [4] J. C. San Miguel, “Diseño de un cargador de baterías de 12 V haciendo uso de un panel fotovoltaico aplicado en zonas rurales”, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2009.
- [5] C. Peña Ordóñez, “Estudio de baterías para vehículos eléctricos”, Universidad Carlos III de Madrid, 2011.
- [6] C. H. Cai, D. Du, y Z. Y. Liu, “Battery state-of-charge (SoC) estimation using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS)”, *12th IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst.*, vol. 2, pp. 1068–1073, 2003.
- [7] QUADIS, “¿Qué son las flotas de vehículos?”, 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.quadis.es/blog/guias-de-compra-de-coches/que-son-las-flotas-de-vehiculos-b158116.html>. [Consultado: 20-sep-2018].
- [8] F. para la S. Geoambiental, “Material Particulado”, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.saludgeoambiental.org/material-particulado>. [Consultado: 25-sep-2018].
- [9] F. Motoa, “Las ciudades del mundo donde respirar es como fumar cigarrillo”, *El Tiempo*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.eltiempo.com/bogota/ciudades-del-mundo-con-la-peor-calidad-del-aire-para-respirar-213180>. [Consultado: 01-oct-2018].
- [10] STATISTA, “El portal de estadísticas: Los países más contaminantes del mundo”, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://es.statista.com/grafico/9662/los-paises-mas-contaminantes-del-mundo/>. [Consultado: 12-ago-2018].
- [11] J. P. Vega, “Alerta roja por aire en Medellín afectaría el comercio”, *La República*. [En línea]. Disponible en: [www.larepublica.co/economia/alerta-roja-por-aire-en-medellin-afectaria-el-comercio-2487131](http://www.larepublica.co/economia/alerta-roja-por-aire-en-medellin-afectaria-el-comercio-2487131). [Consultado: 26-abr-2018].
- [12] C. L. Terán, “Aplicación de métodos algebraicos para la estimación del estado de carga de baterías de litio en aplicaciones de vehículos eléctricos”, Universidad Nacional de Colombia, 2017.
- [13] J. Miles y S. Potter, “Developing a viable electric bus service: The Milton Keynes demonstration project”, *Res. Transp. Econ.*, vol. 48, pp. 357–363, 2014.
- [14] C. Chan y Y. Wong, “Electric vehicles charge forward”, *IEEE Power and Energy*

*Magazine*, pp. 24–33, 2004.

- [15] X. Zhang, H. Peng, H. Wang, y M. Ouyang, “Hybrid lithium iron phosphate battery and lithium titanate battery systems for electric buses”, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, núm. 2, pp. 956–965, 2018.
- [16] M. Glotz-Richter y H. Koch, “Electrification of public transport in cities (Horizon 2020 ELIPTIC Project)”, *Transp. Res. Procedia*, vol. 14, pp. 2614–2619, 2016.
- [17] G. Gibson, R. Milnes, M. Morris, y N. Hill, “Public transport”, *Energy Technol. Netw.*, 2011.
- [18] M. Rogge, S. Wollny, y D. U. Sauer, “Fast charging battery buses for the electrification of urban public transport-A feasibility study focusing on charging infrastructure and energy storage requirements”, *Energies*, vol. 8, núm. 5, pp. 4587–4606, 2015.
- [19] P. Sinhuber, W. Rohlf, y D. Uwe Sauer, “Conceptual considerations for electrification of public city buses - Energy storage system and charging stations”, *2010 Emobility - Electr. Power Train*, 2010.
- [20] M. Bartłomiejczyk, V. Stýskala, R. Hrbáč, y M. Połom, “Trolleybus with traction batteries for autonomous running”, *Proc. 7th Int. Sci. Symp. Electr. Power Eng.*, pp. 204–206, 2013.
- [21] A. E. Diez *et al.*, “Trolleybuses in Smart Grids as effective strategy to reduce greenhouse emissions”, *2012 IEEE Int. Electr. Veh. Conf.*, pp. 1–6, 2012.
- [22] D. Perrotta *et al.*, “Route planning for electric buses: A case study in Oporto”, *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 111, pp. 1004–1014, 2014.
- [23] D. Goehlich, F. Spangenberg, y A. Kunith, “Stochastic total cost of ownership forecasting for innovative urban transport systems”, *IEEE Int. Conf. Ind. Eng. Eng. Manag.*, pp. 838–842, 2014.
- [24] A. E. Diez, P. D. Alzate, y J. V Restrepo, “Marco teórico respaldo a pliegos de buses modelación de costos”, Medellín, 2014.
- [25] T. Navidi, Yue Cao, y P. T. Krein, “Analysis of wireless and catenary power transfer systems for electric vehicle range extension on rural highways”, *2016 IEEE Power Energy Conf. Illinois*, pp. 1–6, 2016.
- [26] M. Bartłomiejczyk, “Practical application of in motion charging: Trolleybuses service on bus lines”, *Proc. 2017 18th Int. Sci. Conf. Electr. Power Eng. EPE 2017*, 2017.
- [27] S. Jeong, Y. J. Jang, y D. Kum, “Economic Analysis of the Dynamic Charging Electric Vehicle”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, núm. 11, pp. 6368–6377, 2015.
- [28] P. Restrepo, “Metodología para la implementación de buses eléctricos con baterías Litio-Titanato en la ruta Circular Sur 302 de Medellín”, Universidad Pontificia Bolivariana, 2018.
- [29] J. Bedoya y E. Martinez, “Calidad del aire en el Valle de Aburrá, Antioquia”, *DYNA*,

vol. 76, núm. 158, 2008.

- [30] Z. Nikolic y Z. Zivanovic, "The application of electric drive technologies in city buses", *Intech. New Gener. Electr. Veh.*, vol. 6, pp. 166–203, 2016.
- [31] A. Kunitz, R. Mendelevitich, y D. Goehlich, "3. Electrification of a city bus network— An optimization model for cost-effective placing of charging infrastructure and battery sizing of fast-charging electric bus systems", *Int. J. Sustain. Transp.*, vol. 11, núm. 10, pp. 707–720, 2017.
- [32] A. Hincapié, A. E. Díez, y A. Bohórquez Cortázar, "Análisis de riesgo y asegurabilidad del sistema de transporte masivo Trolebús", *Rev. Investig. Apl.*, vol. 9, núm. 1, pp. 44–56, 2015.
- [33] F. C. Sun, B. Liu, y Z. P. Wang, "Analysis of energy consumption characteristics of dual-source trolleybus", *IEEE Transp. Electrif. Conf. Expo, ITEC Asia-Pacific 2014 - Conf. Proc.*, pp. 1–5, 2014.
- [34] Metrocali SA, "Guía de diseño del espacio público de las paradas pretroncales y alimentadoras del SITM-MIO". Cali, 2013.
- [35] P. Alzate, "Metodología para la inserción de un sistema BRT de mediana capacidad en Colombia", Universidad Pontificia Bolivariana, 2017.
- [36] N. X. Montezuma y R. Palma, "Problema de predespacho de unidades con unidades de representación de almacenamiento a base de baterías", Universidad de Chile, 2014.
- [37] Victron Energy, "Baterías de fostado de hierro y litio". Almere, 2015.
- [38] F. Baronti, R. Roncella, R. Saletti, G. Pede, y F. Vellucci, "Smart LiFePO4 battery modules in a fast charge application for local public transportation", *2014 AEIT Annu. Conf. - From Res. to Ind. Need a More Eff. Technol. Transf. AEIT 2014*, núm. May 2017, 2015.
- [39] J. M. Duarte, V. Alfonsín, y C. Casqueiro, "Estudio para la conversión de un vehículo militar URO Vamtac con motor de combustión en uno propulsado eléctricamente por baterías", Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar, 2015.
- [40] I. Basallote, "Estudio de viabilidad de la recuperación energética en suspensiones de autobuses de transporte urbano", 2016.
- [41] Battery University, "Types of Lithium-ion", 2018. [En línea]. Disponible en: [http://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](http://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/types_of_lithium_ion). [Consultado: 04-jul-2018].
- [42] Á. Garcia, "BYD Batteries: Comercial, product, installation an service training". 2017.
- [43] J. Aracón, "Diseño de una subestación de transformación para traccion eléctrica", Universidad de la Rioja, 2012.
- [44] L. Gantes, "Diseño de dos subestaciones eléctricas de tracción y sus centros de

- autotransformación asociados”, Universidad de Sevilla, 2017.
- [45] S. Serra, “Proyecto eléctrico de una subestación de tracción ferroviaria”, Escola Politecnica Superior d’Enginyeria de Vilanova i la Geltrú, 2017.
- [46] D. Steen y L. A. Tuan, “Fast charging of electric buses in distribution systems”, *PowerTech 2017*, 2017.
- [47] Bartłomiejczyk M., “Praktyczna aplikacja In Motion Charging w Gdyni: trolejbusy w obsłudze linii autobusowych”, *Autobusy Tech. Eksploat. Syst. Transp.*, vol. 7–8, núm. 3092, pp. 58–64, 2016.
- [48] OpenTrack Railway Technology Ltd., “OPEN TRACK: Simulación de redes ferroviarias”. Zürich, 2013.
- [49] MathWorks, “MATLAB”, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>. [Consultado: 02-sep-2018].
- [50] EcuRed, “MATLAB”, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecured.cu/MATLAB>. [Consultado: 02-sep-2018].
- [51] F. Domenech, “Trenes movidos por motores de continua: mejoramiento del desempeño vinculados al empleo de equipos de electrónica de potencia”, Universidad de Chile, 2007.
- [52] T. Kulworawanichpong y S. Punpaisarn, “Dynamic Simulation of Electric Bus Vehicle”, vol. 2, núm. 3, pp. 99–104, 2014.
- [53] D. E. Guzmán, “Circular Tour”, *UniversoCentro*, Medellín, 2016.
- [54] Google Maps, “Recorrido del Circular Sur 302”,  $6^{\circ}15'4.88''N$   $75^{\circ}35'57.42''O$ , 2017. .
- [55] Google Earth, “Recorrido del Circular Sur 302 con segmentos y paradas”,  $6^{\circ}15'5.05''N$   $75^{\circ}35'55.73''O$ , 2018. .
- [56] V. Kiepe/GmbH, “Kiepe Traction Equipment for the Low-floor Trolleybuses and Articulated Low-floor Trolleybuses for Athens, Greece”. 2015.
- [57] Google Maps, “Vía de trolebús en glorieta Valencia, España”,  $39.992523$  N, -  $0.063933$  E, 2017. .
- [58] Google Maps, “Glorieta de Don Quijote, ruta Circular Sur 302”,  $6^{\circ}14'36.58''N$ ,  $75^{\circ}36'9.87''O$ , 2017. .
- [59] Google Maps, “Vía de trolebús pasando por puente en Gdynia, Polonia”,  $54^{\circ}31'04.9''N$   $18^{\circ}31'53.7''E$ , 2014. .
- [60] Google Maps, “Puente de la Calle 4 Sur, ruta Circular Sur 302”,  $6.203242N$ , -  $75.579087E$ , 2017. .
- [61] K. Traktionsausrüstungen, “Kiepe Traction Equipment for Low-floor Trolley Buses and Articulated Low-floor Trolley Buses for Vancouver, Canada”. Düsseldorf, pp. 0–



5.

- [62] Renault, "Fluence. Life cycle assessment". 2011.
- [63] SolarEnergy, "Inversor InduStronic". 2015.
- [64] C. Jiří Černý, Brno Public Transport Company, "Testing of Five Different Types of Electric Buses". Ljubljana, Slovenia, 2015.
- [65] Y. Wang, C. Zhang, y Z. Chen, "A method for state-of-charge estimation of LiFePO<sub>4</sub>batteries at dynamic currents and temperatures using particle filter", *J. Power Sources*, vol. 279, núm. October 2017, pp. 306–311, 2015.
- [66] M. Restrepo, "Análisis financiero y económico comparativo de la tecnología de buses eléctricos para sistemas de transporte masivo y colectivo en Colombia", Universidad Pontificia Bolivariana, 2010.
- [67] O. Wołek, M., Wyszomirski, "The Trolleybus as an Urban Means of Transport in the Light of the Trolley Project", Gdansk, 2013.
- [68] E. P. de Medellín, "Tarifas y costo de energía eléctrica", Medellín, 2018.
- [69] V. Deutsch, "Cost advice for the implementation of tram and bus systems", *Public Transp. Int.*, vol. 57, núm. 5, pp. 48–51, 2008.

## **ANEXOS**

*Anexo 1. Datos en Google Earth para simulación de la ruta Circular Sur 302*

*Anexo 2. Resultados entregados por Open Track para un recorrido de un bus*

*Anexo 3. Despacho completo de los buses eléctricos duales en un día*

*Anexo 4. Análisis de costos*