

METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BUSES ELÉCTRICOS CON  
BATERÍAS LITIO-TITANATO EN LA RUTA CIRCULAR SUR 302 DE MEDELLIN  
COLOMBIA

PAULA ANDREA RESTREPO URIBE

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA  
MEDELLÍN  
2018

METODOLOGÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BUSES ELÉCTRICOS CON  
BATERÍAS LITIO-LITANATO EN LA RUTA CIRCULAR SUR 302 DE MEDELLÍN

PAULA ANDREA RESTREPO URIBE

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

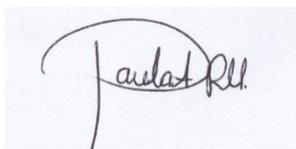
2018

**30 sep. 18**

**Paula Andrea Restrepo Uribe**

“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 on a light blue background. The signature is written in a cursive style and reads "Paula A. Restrepo Uribe".

---

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar agradezco a mis padres y mi hermanita por la comprensión, el apoyo la dedicación, por sus palabras y cariño que me brindaron en este trayecto.

En segunda instancia agradezco a los profesores Andrés Emiro Díez y a Mauricio Restrepo Restrepo por su orientación, paciencia y guía para la realización del este trabajo.

Un agradecimiento especial a mi amigo Julián Rendón, por su valioso acompañamiento, asesoría en la construcción del trabajo de grado y apoyo para la finalización del proceso.

A la estudiante Maria Elisa Briñon Zapata por la compañía en la construcción de todo el trayecto, porque me alentó, me brindó su amistad y compromiso para completar los logros propuestos.

A todas las personas que de alguna manera hicieron parte del proceso porque sin toda esa colaboración no hubiese cumplido la meta.

## CONTENIDO

LISTA DE TABLAS .....	VI
LISTA DE FIGURAS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT .....	XII
INTRODUCCIÓN .....	1
1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	5
1.1. Transporte público.....	5
1.2. Buses eléctricos.....	6
1.3. Trolebuses.....	8
1.4. Buses con batería a bordo .....	9
1.5. Frenado regenerativo .....	10
1.6. Ventajas del transporte público con buses eléctricos .....	11
1.7. Sistemas de trolebuses y buses con batería a bordo .....	11
1.7.1. Sistemas de trolebuses.....	11
1.7.2. Buses con batería a bordo .....	14
1.8. Baterías ion litio .....	16
1.9. Cargadores .....	20
1.9.1. Esquema de recarga .....	20
1.9.2. Carga de oportunidad.....	20
1.9.3. OPPCharge .....	23
1.10. Funciones y opciones tecnológicas .....	24
2. METODOLOGÍA.....	27
2.1. Software.....	28
2.1.1. Software de modelación Open Track .....	28
2.1.2. Software de modelación MATLAB.....	29

2.2.	Cálculo de esfuerzo de tracción.....	30
2.2.1.	Resistencia al avance.....	31
2.2.2.	Resistencia por curvatura.....	31
2.2.3.	Resistencia por pendiente.....	31
2.2.4.	Curva de tracción.....	32
2.3.	Estimación de costos.....	34
3.	ANÁLISIS TÉCNICO.....	36
3.1.	Datos de entrada.....	36
3.1.1.	Características de la ruta Circular Sur 302.....	36
3.1.2.	Características del bus.....	39
3.2.	Casos de análisis.....	40
3.3.	Consumos energéticos.....	41
3.3.1.	Consumos energéticos para un bus.....	41
3.3.2.	Consumos energéticos para la flota de buses completa.....	43
3.3.3.	Frenado regenerativo logrado.....	46
3.4.	Selección de las baterías.....	47
3.5.	Estado de carga de las baterías.....	48
3.6.	Selección de cargadores en patio.....	50
4.	ANÁLISIS DE COSTOS.....	52
	CONCLUSIONES.....	60
	TRABAJOS A FUTURO.....	62
	REFERENCIAS.....	63

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Propiedades técnicas de la batería de litio titanato [44].</i>	17
<i>Tabla 2. Características generales de la ruta Circular Sur 302.</i>	38
<i>Tabla 3. Características técnicas de la ruta Circular Sur 302.</i>	38
<i>Tabla 4. Características de los despachos.</i>	38
<i>Tabla 5. Frecuencia de despacho.</i>	38
<i>Tabla 6. Parámetros para un bus padrón [61].</i>	39
<i>Tabla 7. Segmentación de la ruta</i>	40
<i>Tabla 8. Selección de batería</i>	47
<i>Tabla 9. Casos de análisis de infraestructura</i>	52
<i>Tabla 10. Costos de inversión privada- Basados en [4] y [59].</i>	52
<i>Tabla 11. Datos Operativos [59].</i>	52
<i>Tabla 12. Costos Operativos</i>	53
<i>Tabla 13. Costos administrativos</i>	53
<i>Tabla 14. Costos Energéticos [66].</i>	53
<i>Tabla 13. Costos para el caso 1- bus a batería [4].</i>	53
<i>Tabla 14. Costos para el caso 1- bus dual [4] y [68].</i>	54
<i>Tabla 15. Costos para el caso 2- bus a batería [4].</i>	54
<i>Tabla 16. Costos para el caso 2- bus dual [4] y [68].</i>	54
<i>Tabla 17. Costos para el caso 3- bus a batería [4].</i>	54
<i>Tabla 18. Costos para el caso 3- bus dual [4] y [68].</i>	55
<i>Tabla 21. Valor Anual Equivalente.</i>	58

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Contaminación del aire por sectores [2].</i>	5
<i>Figura 2. Bus articulado [26].</i>	7
<i>Figura 3. Bus padrón [26].</i>	7
<i>Figura 4. Esquema de trolebús [27].</i>	8
<i>Figura 5. Esquema general de un bus eléctrico con batería a bordo [29].</i>	10
<i>Figura 6. Trolebuses de la ciudad de Parma [33].</i>	12
<i>Figura 7. Trolebuses de la ciudad de Castellón de la Planar [35].</i>	12
<i>Figura 8. Trolebuses de la ciudad de Quito [36].</i>	13
<i>Figura 9. Trolebuses de la ciudad de Mérida [37].</i>	13
<i>Figura 10. Bus con batería a bordo de la ciudad de Barcelona [39].</i>	14
<i>Figura 11. Bus con batería a bordo de la ciudad de Shenzhen [41].</i>	15
<i>Figura 12. Bus con batería a bordo de la ciudad de Berlín [43].</i>	15
<i>Figura 13. Relación entre las características relevantes para las baterías de litio titanato, modificado de [44].</i>	18
<i>Figura 14. Capacidad de pasajeros para un bus de 12m, en función del peso de la batería [4].</i>	19
<i>Figura 15. Autobús eléctrico Hybricon y sistema de barra deslizante Opbrid [50].</i>	21
<i>Figura 16. Bus eléctrico Linkker y estación de carga rápida en Espoo, Helsinki [51].</i>	21
<i>Figura 17. Autobús híbrido de Volvo y sistema de carga de pantógrafo deslizante de Opbrid en Gotemburgo [52].</i>	22
<i>Figura 18. Esquema de recarga OppCharge [54].</i>	24
<i>Figura 19. Matriz morfológica de las opciones disponibles en sistemas de buses eléctricos [4].</i>	25
<i>Figura 20. Opciones seleccionadas modificada de [4].</i>	26
<i>Figura 21. Metodología propuesta para el desarrollo del proyecto.</i>	27
<i>Figura 22. Componentes de la herramienta de simulación Open Track [55].</i>	28
<i>Figura 23. Análisis de datos con MATLAB [56].</i>	30
<i>Figura 23. Descomposición de la masa del tren en una componente normal y una componente paralela a la vía [57].</i>	32
<i>Figura 25. Curva de tracción para motor diésel y motor eléctrico [58].</i>	33
<i>Figura 26. Recorrido Circular Sur 302 [60].</i>	37
<i>Figura 27. Curva de tracción de un bus padrón analizado.</i>	40
<i>Figura 28. Esquema de circuito de potencia para bus eléctrico alimentado por batería [61].</i>	41
<i>Figura 29. Potencia de un bus en un recorrido de la ruta, Consumo energético de un</i>	

<i>bus en un recorrido completo .....</i>	42
<i>Figura 30. Distancia recorrida por segmento entre cargadores Caso 1, 2 y 3.....</i>	43
<i>Figura 31. Posición de los buses en el transcurso del día-Caso1.....</i>	44
<i>Figura 32. Posición de los buses en el transcurso del día-Caso2.....</i>	44
<i>Figura 33. Posición de los buses en el transcurso del día-Caso3.....</i>	45
<i>Figura 34. Curva de potencia total de la flota en un día completo de operación.....</i>	45
<i>Figura 35. Consumo energético de un bus en un recorrido completo.....</i>	46
<i>Figura 36. Energía diaria producida por un bus gracias al frenado regenerativo.....</i>	47
<i>Figura 37. Estado de carga de las baterías para los 3 casos de cargadores.....</i>	49
<i>Figura 38. Estado de carga de las baterías para los 3 casos de cargadores considerando envejecimiento.....</i>	50
<i>Figura 39. Estado de carga de las baterías en patio al final del recorrido.....</i>	51
<i>Figura 40. Comparativo de costos de inversión en los tres casos de análisis .....</i>	56
<i>Figura 41. Precio de cargadores para buses a batería .....</i>	57
<i>Figura 42. Valor anual equivalente comparado entre buses duales y buses a batería. .</i>	59

## GLOSARIO

**CARGADOR ELÉCTRICO:** Elemento usado para suministrar corriente eléctrica adecuada para la cantidad de energía requerida por una batería [1].

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

**CAPACIDAD DE LA BATERÍA:** Es la cantidad medida de amperios hora (Ah) que puede suministrar o aceptar una batería [3].

**CARGA DE OPORTUNIDAD:** también se denomina carga rápida, esta implica que las baterías reciban carga varias veces durante la operación en un corto lapso de tiempo[4].

**CARGA DINÁMICA:** Carga de baterías que se realiza mientras el autobús está conectado a una catenaria [4].

**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 [3].

**BATERÍA:** Dispositivo fiable para el almacenamiento de energía eléctrica, convirtiendo la energía eléctrica en energía química y viceversa [3].

**DENSIDAD GRAVIMÉTRICA DE ENERGÍA:** Relación entre la energía disponible en una batería y su volumen o masa [4].

**ESTADO DE CARGA:** Es un parámetro para describir cuánta energía tiene la batería, o cuánto puede durar la carga [5].

**FLOTA:** Conjunto de vehículos destinados a cumplir un objetivo dentro de una empresa transportadora [6].

**FRENADO REGENERATIVO:** Mecanismo de frenado para el vehículo que permite generar energía a partir de la energía cinética, por lo general energía eléctrica, para recargar las baterías [7].

**ÍNDICE C:** El culombio o coulomb (símbolo C) es la unidad derivada del sistema internacional para la medida de la magnitud física “cantidad de electricidad” (carga eléctrica) [5]. Es la razón de carga o descarga expresada en amperios y hora. Con frecuencia se utilizan múltiplos y submúltiplos de este índice, para definir la magnitud de la corriente de carga o de descarga de la batería [3].

**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].

**PANTÓGRAFO:** Mecanismo articulado que permite la captación de electricidad ya sea de una red o estructura definida [2].

**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 [3].

## RESUMEN

En el presente trabajo de grado se presenta un estudio técnico y de valoración económica que pretende evaluar la viabilidad del reemplazo de la flota actual de la ruta Circular Sur 302 por buses impulsados por motor eléctrico, y alimentados mediante baterías del tipo litio titanato.

En la primera parte del documento, se incluye una recopilación de información acerca de los buses eléctricos en zonas urbanas, de la tecnología de baterías de litio titanato, y de cargadores de oportunidad como parte de la infraestructura para la electrificación total de ruta.

El análisis técnico parte del consumo energético de la nueva flota, obtenido mediante simulación numérica en el software Open Track, cuyo modelo tiene en cuenta la frecuencia de despacho y las características de la ruta y de los buses. Posteriormente, se realiza un análisis estadístico de los resultados obtenidos con Open Track empleando una herramienta propia desarrollada en Matlab. La herramienta permite dimensionar el tamaño de las baterías y la infraestructura (cargadores tanto en ruta como en patios) necesaria para la operación normal de los buses.

Por otra parte, se realiza un análisis de costos en el cual se tiene en cuenta los precios de las baterías, la infraestructura necesaria para la operación del sistema, y algunos precios operativos para los diferentes escenarios planteados. Los resultados del análisis de costos de los buses a batería se comparan con los costos de buses duales, dando como resultado que las diferencias en este aspecto no son muy significativas.

La evaluación realizada demostró la viabilidad técnica de la implementación de la tecnología de buses eléctricos con baterías de litio titanato en la ruta Circular Sur 302, puesto que los resultados técnicos arrojaron un comportamiento adecuado para varios escenarios respecto al número, ubicación y capacidad de los cargadores. Se observó igualmente que los precios son equiparables con tecnologías de buses eléctricos duales con baterías de litio ferrofosfato en esquemas de carga dinámica. Por último, se mostró que los buses eléctricos con batería de litio titanato generan un menor impacto sobre la calidad de aire, por lo que se espera que esta tecnología sea considerada a futuro en las renovaciones de flotas de buses urbanos en Medellín.

Palabras clave: Bus eléctrico, batería de litio titanato, carga de oportunidad, consumo energético, estado de carga, frenado regenerativo, transporte sostenible.

## ABSTRACT

This work presents a technical study and a costs analysis to evaluate the feasibility of replacing the current fleet of Circular Sur 302 bus route in Medellin, Colombia, with electric buses using lithium-titanate batteries.

In the first part of this document, information about electric buses in urban areas, lithium-titanate battery technology, and fast-charging stations as part of the infrastructure for bus route electrification, is analyzed. Then, the energy consumption of the bus fleet is obtained through numerical simulation using Open Track software. The model takes into account the frequency of dispatches, and both route and bus specifications. Afterwards, a statistic analysis over the results of Open Track is made using a computation model in Matlab. The tool allows to calculate the size of the batteries and the infrastructure (both chargers in route and depots) needed for the normal bus operation.

The technical analysis is complemented with a costs analysis, which takes into account the lithium titanate battery prices, the charging infrastructure costs, and some of the operation and maintenance costs for the three considered scenarios. These results are compared against dual buses, showing no big differences between them.

These evaluations confirmed the feasibility of implementing electric buses with lithium-titanate batteries in the Circular Sur 302 route, since the technical results are suitable for several scenarios in terms of quantity, location and power of the chargers. It was also observed that prices are similar to those of dual electric buses using lithium-ferrophosphate batteries within a dynamic charging scheme. Lastly, electric buses with lithium-titanate batteries are less harmful to air quality than other bus technologies, such as diesel and natural gas buses, and thus, it is expected that this technology will be considered in the future when the buses of Medellin's public transportation fleet are modernized.

Key words: Electric buses, lithium-titanate battery, opportunity charging, energy consumption, state of charge, regenerative braking, sustainable transportation.

## INTRODUCCIÓN

El aumento del material particulado en suspensión y el rápido deterioro de la calidad del aire en las ciudades densamente pobladas, ha generado un creciente interés de los gobiernos locales por tratar de mitigar los efectos que esta situación podría conllevar. Varios estudios demuestran gran parte de la contaminación en las ciudades se debe al transporte público y privado, pues la mayoría de los vehículos funcionan a partir de derivados de petróleo, cuya combustión genera subproductos que impactan negativamente la calidad del aire [9].

En ciudades como Barcelona, Londres, París, Los Ángeles, Pekín, entre otras grandes metrópolis, se han reportado preocupantes índices de contaminación, es decir, partículas sólidas o líquidas de sulfatos, nitratos, carbón y amoníaco que podrían causar enfermedades respiratorias graves. Buscando atenuar esta problemática, y con el fin de acercarse más a la meta de zonas y ciudades sanas para el ser humano, estas grandes ciudades han optado por la implementación de ciertas medidas, entre las cuales se incluye la prohibición de furgonetas con fecha de matriculación antigua, la restricción de los vehículos más contaminantes, la promoción del transporte público, la construcción de carriles para bicicletas, la ampliación de zonas verdes, el incremento de impuestos a vehículos viejos, el control de tráfico, la implementación de vehículos eléctricos, el aumento de calles peatonales, y la renovación de flotas con autobuses de cero emisiones[10].

Una problemática similar se presenta en Medellín, en donde 2,5 millones de habitantes coexisten con un parque automotor de 200 mil vehículos particulares, 6 mil buses y 27 mil motocicletas (de dos y cuatro tiempos), con aproximadamente 277 mil vehículos matriculados en la ciudad a 2018 [11]. Adicionalmente, en Medellín y su área metropolitana se realizan múltiples actividades industriales, afectando de manera desfavorable la calidad del aire que respiran sus habitantes, causando que un 20% de las consultas médicas sean por enfermedades respiratorias [12].

La deficiencia en los sistemas de transporte público y el aumento de la población, la cual necesita moverse en ciudades cada vez con mayor extensión territorial, hacen que más personas deseen adquirir vehículos propios, dificultando aún más la movilidad y empeorando la situación ambiental. Medellín, a pesar de contar con un sistema de transporte masivo basado en trenes eléctricos, necesita reforzar la oferta de medios de transporte, principalmente para la clase trabajadora que se desplaza incluso desde los municipios aledaños, de tal manera que el transporte público sea alternativa atractiva para todos los ciudadanos [6].

Por lo anterior es oportuno buscar soluciones que aplaquen la situación ambiental y de movilidad en la ciudad de Medellín, así como lo plantean las grandes ciudades, haciendo necesario realizar estudios de sistemas de transporte masivo que sean amigables con el medio ambiente y que puedan brindar un servicio de calidad, siendo los trolebuses y buses eléctricos una opción atractiva que suple las necesidades mencionadas.

Los trolebuses cuentan con tracción eléctrica y se alimentan permanentemente desde líneas

aéreas de corriente directa por medio de un sistema de captación conocido como trole [2]. Los buses eléctricos alimentan al motor eléctrico por medio de baterías que pueden ser cargadas por la red eléctrica convencional, puntos de carga específicos, o pueden ser reemplazadas por un nuevo conjunto de baterías completamente cargadas [13]. Ambas tecnologías se consideran flexibles, sostenibles y de emisiones bajas, siendo amigables con el medio ambiente, y pudiéndose adaptar de manera adecuada a las necesidades planteadas y a la topografía de la ciudad [14].

Diversos autores han incursionado en el tema de estudio e implementación de rutas electrificadas con buses eléctricos duales o buses eléctricos de batería. En varias de estas investigaciones se tienen diferentes variables a considerar, por ejemplo una de estas es la viabilidad operativa para los buses eléctricos de batería que se plantea en [15]. En este artículo los autores identifican que al electrificar una flota ésta podría disminuir su servicio, concluyendo que se debería implementar infraestructura adicional como cargadores o más autobuses para mantener la frecuencia actual que demanda la ruta analizada, lo que supondría un incremento en los costos. Por otro lado, en [16] se realiza una revisión de la operación de buses eléctricos a nivel mundial, resaltando que la disponibilidad operativa, es decir, la relación rango/carga, no puede mejorarse solamente con esquemas de intercambio de baterías o de carga de oportunidad.

Otra variable importante que impacta el análisis de los buses a batería, es la relación que tienen las características de las rutas con el consumo de energía de los vehículos. Los autores en [17] argumentan que aquellas rutas de corta distancia entre paradas y con un alto número de curvas en su trayecto son las más demandantes de energía, resaltando la recuperación de energía por parte del frenado regenerativo. Un estudio más a fondo de las variables que determinan el consumo de energía específico de una ruta para calcular el tamaño de una batería se realiza en [18], utilizando un modelo de simulación en el cual se parametrizan los perfiles de carga para vehículos y se comparan los resultados con la operación de un bus real, concluyendo que la electrificación de rutas es viable. Por otro lado, en [19] se analiza la capacidad de los pasajeros y la batería utilizando carga rápida, mediante una herramienta de simulación que determina los perfiles de carga específicos de la ruta y evalúa los datos arrojados con datos registrados de la operación real, teniendo como resultado los perfiles de demanda de potencia y energía específicos, demostrando que una ruta de autobuses puede estar completamente electrificada con las tecnologías actuales de baterías.

Las configuraciones de la capacidad de la batería y los cargadores tienen un impacto significativo en la viabilidad de los buses eléctricos a batería. En [20], se discute el dimensionamiento de las baterías y la infraestructura de carga rápida, y se evalúa el consumo de energía y rendimiento de las baterías en buses eléctricos de tránsito urbano en rutas reales. Adicionalmente, se desarrolla un análisis sobre la viabilidad de la electrificación de los autobuses y su rendimiento en las rutas, resaltando que los eventos de carga rápida juegan un papel importante en la reducción del tamaño de la batería y el aumento de la confiabilidad del servicio.

Es importante mencionar que para la carga rápida se necesita un tipo de batería que soporte

altas potencias de carga. Como se indica en [21], uno de los tipos de batería que mejor se adapta a este esquema de recargas son las fabricadas con litio titanato, que se caracterizan por una vida útil más larga (dos veces más que la de litio ferrofosfato), corrientes de carga y descarga mayores, y rango de temperatura de operación más amplio, lo cual redundará en mayor eficiencia durante la operación del vehículo.

La referencia [22] presenta un modelamiento detallado con los diferentes tipos de carga, considerando entre estos la carga flash o rápida, la carga de oportunidad, y la carga lenta. El modelo desarrollado en este artículo cuantifica la demanda de energía necesaria para diseñar la infraestructura de recarga requerida por la flota, establece la viabilidad operacional, y genera un perfil de carga; sin embargo, no presenta muchos detalles respecto a las tecnologías de carga y almacenamiento. Un trabajo complementario a este estudio se presenta en [4], en el cual se plantea una metodología detallada para el diseño integral de un sistema factible de buses electrificados, identificando la solución más adecuada según ciertos requisitos estratégicos y operativos. En este artículo se presenta una selección de tecnologías de buses eléctricos basada en un análisis económico mediante un modelo de costo total de propiedad., concluyendo que los autobuses eléctricos son tecnologías técnicamente aplicables y que llegarán a ser competitivos a partir del 2025.

Para el caso especial de estaciones de carga en ruta, y el número necesario de estas para un buen funcionamiento del sistema, los autores en [14] implementan un modelo de simulación de eventos discretos que evalúa el consumo de energía del bus, acompañado de una estrategia de optimización para minimizar los cargadores y el tiempo de carga. La conclusión de este artículo es que los cargadores contribuyen a la operación del sistema con altos niveles de energía almacenada en baterías, lo que extiende su ciclo de vida.

Como se observó anteriormente, a nivel mundial se han desarrollado diferentes estudios que buscan implementar y desarrollar tecnologías amigables con el medio ambiente, entre las cuales se destacan los sistemas de transporte público eléctrico. Sin embargo, en Colombia son pocas las investigaciones para poner en funcionamiento sistemas de transporte eléctrico, en particular sistemas basados en buses eléctricos a batería. Lo que se busca con el presente trabajo de grado es estudiar el comportamiento de esta alternativa tecnológica en una ruta de buses emblemática de Medellín, y la viabilidad de su implementación según las características del entorno analizado, contribuyendo a solucionar parte de la problemática de la ciudad en términos ambientales y de movilidad. Dicha ruta se denomina Circular Sur 302, la cual se extiende por aproximadamente 21,8 km, pasando por algunas de las principales vías de la ciudad como la Avenida del Ferrocarril, la Avenida Oriental, la Avenida Las Vegas, la Avenida 80 y la Calle 44 San Juan.

El presente estudio incluye una evaluación técnica y una estimación inicial de costos para la electrificación de la ruta Circular Sur 302 con buses de baterías de litio titanato y un sistema de cargadores de oportunidad. Para la evaluación técnica se propone un modelo que permite calcular los consumos energéticos actuales de la ruta, brindando información para la estimación de la infraestructura de recarga necesaria y el dimensionamiento de las baterías.

Este trabajo de grado se desarrolló de forma paralela con la estudiante de Maestría Maria Elisa Briñon Zapata [23], la cual realizó un estudio de la misma ruta, pero considerando buses eléctricos duales con respaldo a batería de litio ferrofostato bajo un esquema de recarga dinámica. Este último consiste en utilizar la catenaria que alimenta el bus eléctrico para recargar la batería de respaldo mientras el bus se desplaza normalmente sobre su recorrido. Gracias a este trabajo paralelo, se logró una comparación técnica y de costos detallada entre los buses a batería con recarga de oportunidad, y los buses eléctricos duales con recarga dinámica, dando señales útiles para para la electrificación futura de la ruta Circular Sur 302 y otras rutas de transporte público en Medellín.

El resto de este documento se estructura de la siguiente manera: En el primer capítulo se presenta una descripción general de las tecnologías de buses eléctricos, se documentan algunos casos de éxito sobre rutas de transporte público que han migrado de tecnologías basadas en combustibles fósiles a tecnologías limpias, y se exponen las generalidades de las estrategias de recarga para buses. En el segundo capítulo se describe la metodología implementada para el desarrollo del trabajo de grado y se detallan los procesos realizados para obtener las conclusiones. A continuación, en el tercer capítulo, se analiza el consumo de energía de los buses eléctricos mediante el software Open Track, y se determina el tamaño de baterías y cargadores. Posteriormente, en el cuarto capítulo, se desarrolla la evaluación de costos comparativa entre la tecnología de buses de batería y buses duales. Por último, se presentan los resultados, conclusiones y recomendaciones.

## 1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Los autobuses que se utilizan actualmente en los sistemas de transporte público en Colombia trabajan a base de diésel o gas, lo que impacta negativamente la calidad del aire de las ciudades. Por su parte, los buses eléctricos representan una tecnología alternativa cuyo impacto en la calidad del aire es muy bajo, representando una posible solución a los problemas de contaminación en las ciudades colombianas. En el presente capítulo se describen las tecnologías de buses eléctricos y sus diferentes componentes, incluyendo baterías y cargadores, y se discuten algunos casos de electrificación de rutas de buses.

### 1.1. Transporte público

Se puede definir como un sistema de transporte de pasajeros disponible para cualquier persona sin ningún tipo de restricciones, siempre y cuando se cumplan las condiciones de un operador como lo puede ser el pago del servicio. Pueden ser de propiedad pública o privada y operan por lo general en horarios y rutas definidos normalmente por el gobierno. El transporte público juega un papel importante para aquellas personas que no cuentan con vehículos particulares, e incluye diferentes medios como lo puede ser autobuses, taxis, trolebuses, entre otros. Para el desarrollo de este trabajo de grado se enfatizará en los sistemas de autobuses eléctricos [24].

Como puede apreciarse en la Figura 1, a nivel mundial el transporte genera el 14 % de contaminación. Sin embargo, el caso de Medellín es muy particular, pues cerca del 86 % de la contaminación que se presenta en la ciudad es debida al transporte terrestre, tanto público como privado [10].



Figura 1. Contaminación del aire por sectores [1].

Durante las últimas dos décadas se han desarrollado sistemas de transporte público masivo en las grandes ciudades de Colombia, basados en buses que utilizan derivados del petróleo como alimentación. A pesar de que los planes de movilidad de las ciudades colombianas proponen algunas soluciones de movilidad con energía eléctrica, estas propuestas no son suficientes, desaprovechando la gran ventaja hidroeléctrica que tiene el país, e incrementando el uso de

combustibles cuyo suministro futuro es incierto [25].

En el caso de Medellín, su sistema de transporte público se estructura a partir de un metro que recorre la ciudad de norte a sur y de oriente a occidente en dos líneas, alimentando con éstas tres sistemas de teleféricos y una línea de tranvía. Sin embargo, debido al tamaño de la ciudad, también posee numerosas rutas de buses a gas o diésel, que se encargan de hacer recorridos a lo largo y ancho de la ciudad. De este punto parte la necesidad de migrar a tecnologías limpias que reemplacen los buses actuales por buses eléctricos, de cero emisiones, y ayuden a mejorar la calidad del aire en la ciudad.

## 1.2. Buses eléctricos

Los autobuses son vehículos pesados que se usan principalmente para el transporte público urbano, y suelen caracterizarse por tener rutas más 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 [13]. Este tipo de buses se puede categorizar en trolebuses, buses híbridos, y buses con batería a bordo . Por otro lado, también se clasifican este tipo de vehículos de acuerdo con el tipo de carrocería en buses articulados y buses padrones. A continuación se describen estas dos categorías:

- **Bus articulado:** 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 [26]. En la Figura 2 se presenta un ejemplo de bus articulado.

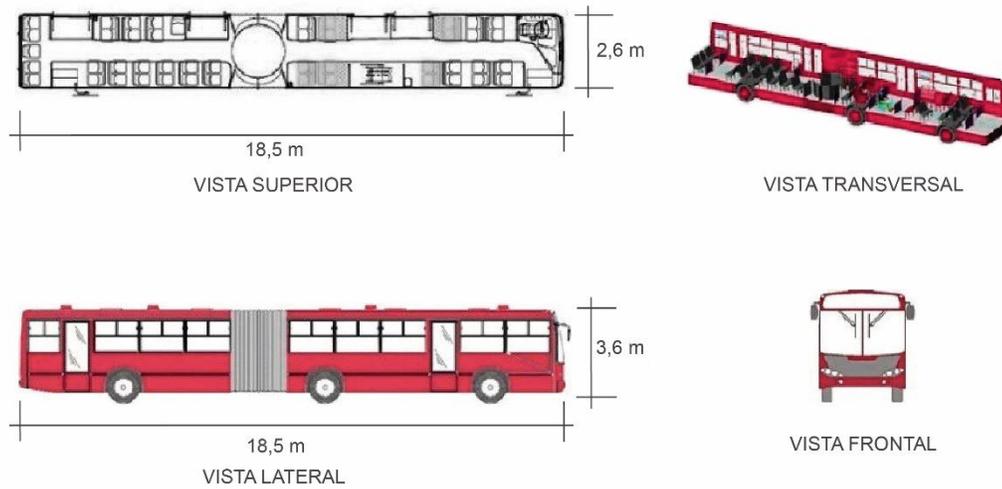


Figura 2. Bus articulado [26].

- **Bus padrón:** Son autobuses que cuentan con una longitud de aproximadamente 14 metros y una sola estructura compacta, es decir, no posee secciones ni particiones de ningún tipo, tal como se observa en la Figura 3. Posee una capacidad de transporte de alrededor de 80 personas [26].

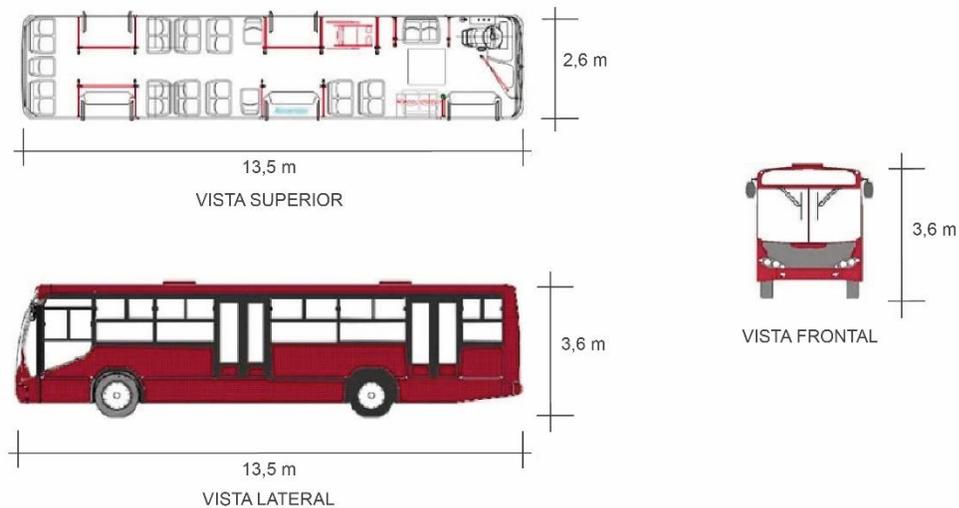


Figura 3. Bus padrón [26].

### 1.3. Trolebuses

Los trolebuses son sistemas de transporte similares a los tranvías, que en vez de ir sobre rieles utilizan llantas convencionales de caucho como los autobuses. Cuenta con tracción eléctrica y su alimentación es a través de líneas aéreas de corriente directa y un sistema de captación conocido como trole, el cual permite la conexión del vehículo en movimiento [2]. Los cables aéreos son comúnmente denominados catenarias, conformando una estructura que confina al autobús a una ruta definida. Sin embargo, esto no exige que el autobús cuente con carril reservado, y por lo tanto no es necesario intervenir las vías. Este factor hace que su inversión inicial sea mucho menor a la de otros sistemas de tracción eléctrica, como los trenes ligeros [13].

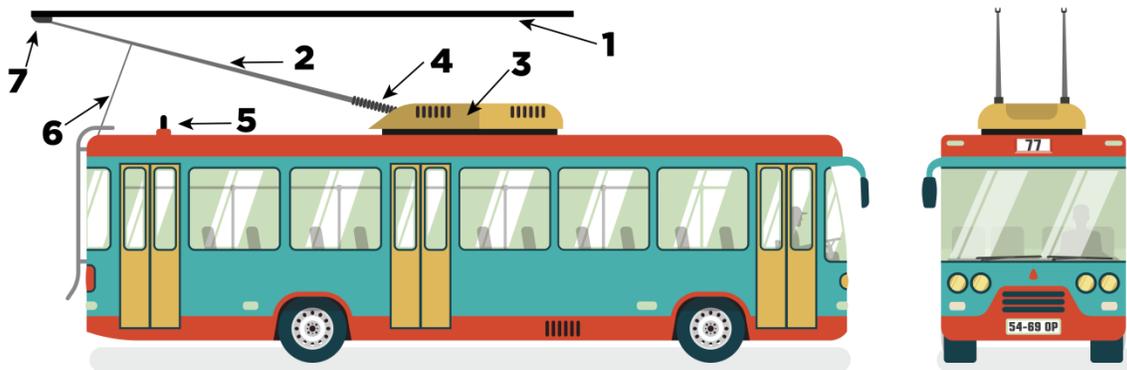


Figura 4. Esquema de trolebús [27].

- 1.Catenaria
- 2.Trole o pantógrafo
- 3.Base del trole
- 4.Resortes de seguridad
- 5.Enganche del trole
- 6.Cable recogedor para conectar o desconectar el bus a la red eléctrica
7. Cabezal, parte del trole en contacto con la red eléctrica.

La catenaria, que es el elemento número uno de este esquema, es el medio por el cual, normalmente se alimenta el trolebús. Estas están suspendidas a una altura mayor a la de los vehículos, los cuales están provistos de pantógrafos 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 para la tensión nominal del sistema y otro para el retorno del circuito.

Para la instalación de las catenarias se requiere de una infraestructura de tamaño considerable.

Por este motivo, el uso de éstas siempre ha generado polémica, pues para algunos pueden no ser agradables a simple vista. Sin embargo, un gusto u opinión no debe ser la base de una decisión, por tal motivo es necesario realizar cálculos y análisis precisos los cuales enfrenten los beneficios y desventajas de este sistema de tracción, para poder tomar decisiones objetivas que sean lo más beneficiosas posibles para las comunidades.

En la actualidad se han buscado diseños nuevos para las catenarias, los cuales sean arquitectónicamente acordes con los paisajes urbanos de diferentes ciudades, con el fin de aliviar la aversión que se tiene por los cables aéreos.

Muchos de los trolebuses actualmente cuentan con sistemas de respaldo de energía para la operación independiente de la línea aérea, como lo son almacenadores de energía tipo batería o ultra capacitores [28].

Otra ventaja adicional que tienen los trolebuses es su posibilidad de intercambio energético con la red eléctrica, es decir, la conexión no sólo sirve para alimentar el bus y cargar la batería de respaldo, sino que también se puede entregar potencia a la red en algunas situaciones. Este aspecto se detallará mejor en otra sección del presente documento, cuando se describa el frenado regenerativo.

Es importante tener en cuenta que este medio de transporte depende normalmente de la energía suministrada por la catenaria para su funcionamiento, por lo tanto es necesario analizar las diferentes opciones que se deben tener en cuenta para evitar que el sistema se detenga, ya sea por desconexión de la línea o por otro tipo de razones que restrinjan la instalación del cable aéreo [28].

#### **1.4. 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 en puntos de recarga específicos, o pueden ser reemplazadas por un nuevo conjunto de baterías completamente cargadas [13]. Un ejemplo de este tipo de buses se presenta en la Figura 5. Este tipo de tecnología permite el aprovechamiento de las horas valle o de baja demanda para la recarga de baterías; sin embargo, para rutas de transporte masivo, debe considerarse recargas durante el rango de tiempo del servicio ofrecido. Dichas recargas se denominan recarga de oportunidad, puesto que logran cargas de alta velocidad aprovechando paradas cortas de los buses en las estaciones de pasajeros [28].

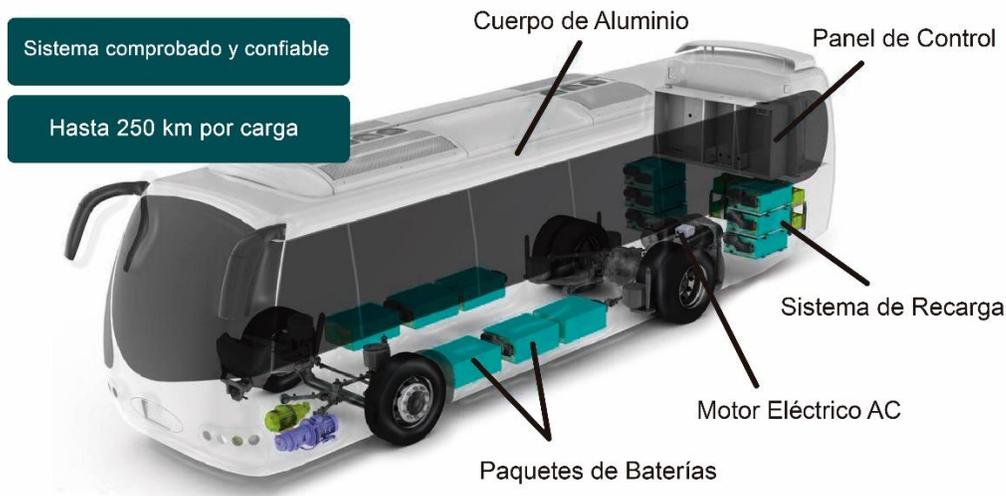


Figura 5. Esquema general de un bus eléctrico con batería a bordo [29].

### 1.5. Frenado regenerativo

Los sistemas de tracción pueden contar con dos tipos de frenado: el mecánico y el eléctrico. El frenado eléctrico es aquel que se realiza mediante la conexión de una impedancia variable con el generador que está acoplado a la transmisión, obteniendo así una desaceleración paulatina que depende de la velocidad y la posición del pedal de freno. El frenado regenerativo basa su efecto en actuar como generador cuando el vehículo se encuentra desacelerando, recuperando así la energía cinética desde las ruedas y convirtiéndola en electricidad para almacenarla en algún dispositivo, ya sean baterías o condensadores. Esta energía almacenada puede usarse posteriormente para alimentar al motor eléctrico cuando esté en funcionamiento, permitiendo así mejorar el rendimiento en el consumo energético [2].

Cuando se alcanza la carga completa en los dispositivos de almacenamiento, no se puede realizar la regeneración. Debido a esto, es común instalar elementos resistivos como carga para el frenado. Por otro lado, sólo para la detención total o para frenados críticos, se utiliza el freno mecánico convencional, permitiendo lograr un aumento en los ciclos de la vida útil del sistema, disminuyendo a la vez costos de mantenimiento [2].

Se observa que, al poseer un frenado regenerativo en los sistemas de tracción eléctricos, se pueden obtener ahorros energéticos considerables. Sin embargo, esta función implica diseñar un excelente sistema de control y de almacenamiento que logre devolver esta energía al sistema cuando el bus se encuentre arrancando y/o cuando se encuentren dos o más buses sobre un mismo trayecto [30].

## **1.6. Ventajas del transporte público con buses eléctricos**

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

- Presentan facilidades para operar en ciudades con altas pendientes (como lo es Medellín).
- Son compatibles con el medio ambiente, pues no emiten gases.
- Usan motores más eficientes y por lo tanto menor consumo de energía respecto a un bus diésel.
- No necesitan vías exclusivas, logrando menores inversiones iniciales y mayor flexibilidad al poder transitar por las vías ya construidas.
- Poseen frenado regenerativo, es decir, cuentan con opción de recuperar energía eléctrica a partir de la energía cinética mientras se encuentran frenando. Esta característica de los sistemas de buses eléctricos puede generar ahorros energéticos considerables. Sin embargo, el aprovechamiento de esta energía implica sistemas de almacenamiento y control que la devuelvan al sistema cuando un trolebús lo necesite.
- Dependiendo del sector por donde se quiera circular, 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 del lugar. 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.
- Cuentan con mayor confiabilidad respecto a otros sistemas de tracción eléctrica, pues si la catenaria llegara a fallar cuentan con las baterías para hacer desplazamientos de emergencia.
- Contribuyen a la mejora en la salud de los ciudadanos y a la disminución de la polución en las ciudades.
- Operan con menores costos de combustible.
- Son gravados con menores impuestos y obtienen incentivos por parte del gobierno.
- Los autobuses eléctricos llaman la atención debido a la capacidad de mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, así como a reducir los contaminantes locales y el ruido en las ciudades [31].

## **1.7. Sistemas de trolebuses y buses con batería a bordo en el mundo**

### **1.7.1. Sistemas de trolebuses**

De este tipo de tecnología para vehículos existen unas 40.000 unidades que circulan en por lo menos 370 países en todo el mundo, tomando mayor fuerza cada vez, por el impacto negativo de vehículos a gasolina o diésel en el medio ambiente [28].

Algunos ejemplos de estos se presentan a continuación:

- **Parma, Italia:** es una ciudad que posee una red de trolebuses de unos 20 km, repartidos en 4 líneas con un total de 133 paradas a una distancia aproximada de 250 metros. La flota total de trolebuses asciende a 34 vehículos y transporta alrededor de 7.500.000 pasajeros por año. Un ejemplo de los trolebuses de Parma se presenta en la Figura 6. La ciudad de Parma tiene como objetivo convertir los trolebuses en uno de las tecnologías de transporte más importantes en las rutas con la mayor densidad de tráfico, creando una alternativa ambientalmente sostenible y energéticamente más eficiente [32].



*Figura 6. Trolebuses de la ciudad de Parma [33]*

- **Castellón de la Plana, España:** El Transporte Metropolitano de la Plana o TRAM de la Plana, está compuesto por trolebuses dotados de un sistema de guiado óptico, equipo que facilita las maniobras de aproximación a las paradas, contribuyendo a mejorar la accesibilidad de los viajeros. La ruta de trolebuses de Castellón tiene 8 km de longitud y 19 estaciones [34]. Una imagen de los trolebuses de Castellón se presenta en la Figura 7.



*Figura 7. Trolebuses de la ciudad de Castellón de la Planar [35]*

- **Quito, Ecuador:** Los trolebuses de esta ciudad forman parte del sistema integrado de transporte, siendo considerados uno de los casos pioneros de transporte público con trolebuses en Latinoamérica. Para el 2010 contaba con 260.000 autobuses, correspondientes al 12 % del total de viajes de la ciudad [2]. En la Figura 8 se presenta un modelo de trolebús articulado del sistema de Quito.



*Figura 8. Trolebuses de la ciudad de Quito [36]*

- **Mérida, Venezuela:** Sistema de transporte masivo que consiste en dos líneas de trolebuses más una tercera línea de sistema de teleférico llamado trolecable. Fue el primer sistema de transporte masivo en ser construido en una ciudad de menos de 500.000 habitantes en Latinoamérica. Como se observa en la Figura 9, cuenta con vehículos articulados con exclusividad de carril para una mejor movilidad en la ciudad [37].



*Figura 9. Trolebuses de la ciudad de Mérida [37]*

### 1.7.2. Buses con batería a bordo

- **Barcelona, España:** Posee 25 buses eléctricos puros que fueron introducidos en la ciudad dentro de un programa que busca aumentar la participación de autobuses ecológicos al 25% del total de la flota. Esta modernización pretende mejorar la calidad del aire del área metropolitana, reduciendo el número de vehículos diésel. Los buses eléctricos de Barcelona cuentan con un sistema de recarga rápida, teniendo el sistema captador en la carrocería del bus. En la Figura 10 se presenta el diseño con el cual está trabajando esta ciudad [38].



Figura 10. Bus con batería a bordo de la ciudad de Barcelona [39]

- **Shenzhen, China:** Ciudad pionera en la electrificación de toda su flota de autobuses. Con un total de 16.000 unidades eléctrica, se prevé que su flota de buses reducirá las emisiones de CO2 en un 48%. Los buses de la ciudad de Shenzhen cuentan con un sistema de recarga lenta que se realiza durante la noche, teniendo en cuenta que el costo de electricidad a esas horas es menor. El gobierno de China asegura que con esta tecnología, a pesar de que los buses son el doble de costosos que los buses diésel, lograrán ahorros en el largo plazo por utilizar energía más económica [40].



Figura 11. Bus con batería a bordo de la ciudad de Shenzhen [41]

- **Berlín, Alemania:** Primera capital europea que incursionó en un proyecto de renovación integral de su flota de transporte público con buses eléctricos, de cara a reducir emisiones, gasto, ruido y modernizar el sector. Los autobuses eléctricos de la ciudad de Berlín corresponden al modelo Urbino de 12 metros y capacidad de 70 pasajeros, y son fabricados en Polonia por la empresa Solaris. En la Figura 12 se observa el tipo de buses padrón que están implementando en estas rutas alemanas [42].



Figura 12. Bus con batería a bordo de la ciudad de Berlín [43].

## 1.8. Baterías ion litio

Las Baterías ion litio son una tecnología fabricada para el almacenamiento de energía eléctrica, la cual funciona mediante un elemento químico denominado litio, el cual es un metal ligero con alta energía específica por peso, es decir, tiene una alta eficiencia energética y un peso liviano.

Todas las baterías eléctricas funcionan mediante un proceso químico entre dos electrodos, uno positivo o cátodo y uno negativo o ánodo. Para el funcionamiento de las baterías de litio, se pueden utilizar diferentes materiales para el cátodo, el cual define la tecnología, formando así varios tipos de baterías. El ánodo normalmente es de grafito y el electrolito conductor suele ser una solución de sales de litio.

Esta tecnología ha sido ampliamente desarrollada y mejorada, haciendo que los fabricantes realicen nuevas combinaciones químicas del litio para brindar diferentes características y que las baterías se puedan acoplar a diferentes procesos. Entre las combinaciones se encuentran las siguientes:

- Dióxido de cobalto
- Níquel manganeso cobalto.
- Litio ferrofosfato.
- Litio titanato.

Las dos últimas familias de baterías son las más atractivas para la industria vehicular puesto que evitan la inestabilidad del litio y tienen la ventaja de no contener materiales tóxicos [44].

En el caso particular de los buses eléctricos se pueden usar las baterías como fuente principal de alimentación de los vehículos, o pueden ser usadas en una tecnología dual, es decir, alimentación principal por catenarias y baterías como fuente de respaldo. Para el primer caso que es el que se desarrolla en este trabajo de grado, la tecnología más atractiva es la de litio Titanato, por su eficiencia.

Las baterías de litio titanato han sido usadas durante varios años en muchos aspectos de la vida cotidiana, entre los que se encuentran teléfonos móviles, computadores portátiles, cámaras digitales, herramientas eléctricas, instrumentos médicos, y equipos de iluminación. Actualmente han incursionado en el ámbito de vehículos eléctricos o híbridos [45].

Este tipo de baterías son dispositivos que poseen una alta capacidad de carga y descarga, pueden cargarse con altas corrientes y de manera rápida. Por lo cual se pueden usar en circuitos inteligentes, sistemas de potencia de los vehículos eléctricos, sistemas de respaldo para usuarios domésticos y de oficina, entre otros sistemas que requieren este tipo tecnología de carga rápida. Sin embargo, se ha reportado que dichas baterías han explotado en estado operacional o apagadas, impactando así el desarrollo de baterías de alta capacidad de almacenamiento [45].

Algunas de las características más representativas de este tipo de batería se mencionan a continuación [46]:

- Puede cargarse y descargarse por altas corrientes.

- Posee un voltaje de descarga estable.
- El electrolito del cual está conformado no se descompone fácilmente.
- Tiene una vida útil más larga.
- Es más adecuado para una carga rápida, de tal forma que cargar hasta el 80% de la capacidad demora sólo 6 minutos.
- Excelente rendimiento a baja temperatura.
- Baja toxicidad.
- Bajo costo del material.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de las propiedades técnicas que poseen las baterías de litio titanato.

*Tabla 1. Propiedades técnicas de la batería de litio titanato [44].*

<b>Voltajes</b>	2.40 V nominal; rango de funcionamiento típico 1.8-2.85 V/celda
<b>Energía específica (capacidad)</b>	50-80 Wh/kg
<b>Carga (basado en tasa de carga C)</b>	1C típico; 5C máximo, carga hasta 2.85 V
<b>Descarga (basado en tasa de descarga C)</b>	10C posible, 30C 5 s pulso; 1.80 V de corte
<b>Ciclo de vida</b>	3,000-7,000
<b>Escapes térmicos</b>	Es una de las baterías de Li-ion más seguras
<b>Costo</b>	~ \$ 1,005 por kWh
<b>Aplicaciones</b>	UPS, tren motriz eléctrico (Mitsubishi i-MiEV, Honda Fit EV), alumbrado público con energía solar

En la Figura 13 se observa que este tipo de tecnología es excelente en cuanto a seguridad, rendimiento ante bajas temperaturas y vida útil. También se resalta que, aunque esta tecnología presenta desventajas en cuanto a su energía específica y costos, se están haciendo esfuerzos para mejorar estos aspectos.



*Figura 13. Relación entre las características relevantes para las baterías de litio titanato, modificado de [44]*

Un elemento que se debe tener en cuenta en las baterías es el peso que posee, puesto que los kg que tiene un bus eléctrico en vacío son similares a la masa de los autobuses diésel, excluidas las baterías de tracción. Por este motivo, es importante hacer el análisis con las baterías, puesto que éstas usualmente suelen ser de varias toneladas, haciendo que se tengan que desplazar pasajeros. Este comportamiento se puede observar mejor en la Figura 14.

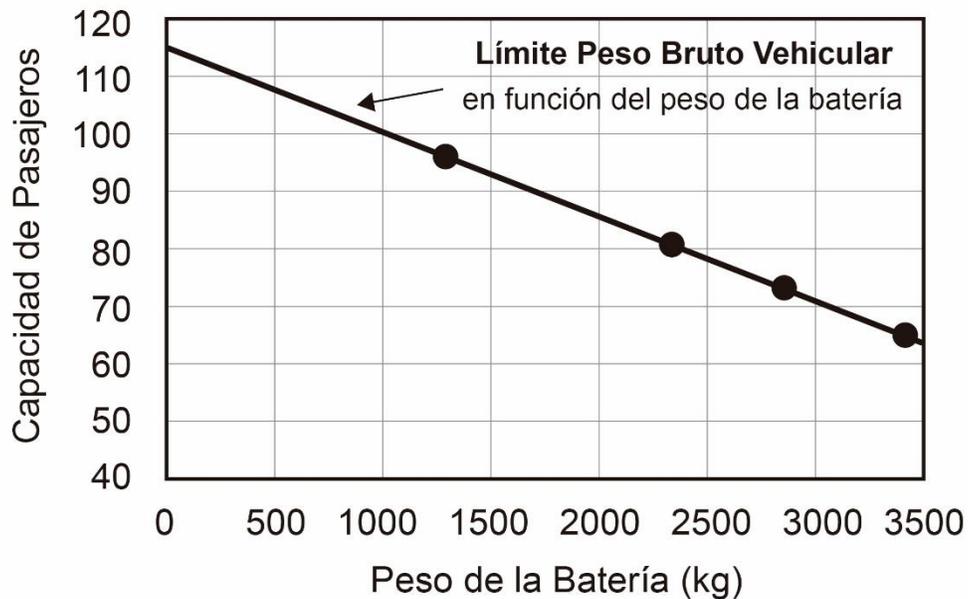


Figura 14. Capacidad de pasajeros para un bus de 12m, en función del peso de la batería [4].

A continuación, se presentan algunos casos de implementación de baterías de tecnología litio titanato en buses alrededor del mundo:

- VECME (Vehículo Eléctrico Colectivo de Movilidad Eficiente): autobús de piso bajo tipo trolebús que opera en la Ciudad de México, con capacidad para 100 pasajeros, autonomía de 20 km, con desconexión automática de troles, recarga en estaciones cada 4 km, baterías de litio titanato, tiempo de recarga de 45-60 segundos, usando alto voltaje de 440 V [47].
- Trolebús Modelo 32100D: Trolebús marca Belkommunmash que opera en la ciudad de Chisináu (Moldavia). Está equipado con baterías litio titanato, lo que le permite recorrer distancias de hasta 20 km sin una línea aérea. Posee una capacidad para 90 personas, carrocería de piso bajo, y un sistema de control de tracción transistorizado para motor, el cual le permite ahorrar hasta 44% del consumo de electricidad (incluyendo recuperación) en comparación con el sistema de control contactor –reóstato [48].
- El e-bus de TOSA: es un trolebús que busca una solución viable para el transporte público urbano, haciendo que las catenarias, las baterías grandes y pesadas, las limitaciones de alcance y programación, así como las emisiones de gases de efecto invernadero y ruido sean cosa del pasado. Además posee una unidad de batería de litio titanato que puede cargarse y descargarse rápidamente se encuentra como producto de la compañía ABB TOSA y tiene buses en circulación en la ciudad Davos de Suiza [49].

## 1.9. Cargadores

### 1.9.1. Esquema de recarga

**Carga de oportunidad:** es un tipo de carga rápida en el que las baterías reciben carga varias veces durante la operación. Es un sistema que implica un tiempo corto de carga y que generalmente se da durante los tiempos de parada en las estaciones terminales o en estaciones de abordaje de pasajeros. Los sistemas de carga de oportunidad son automáticos, ya sean pantógrafos o de tipo inductivos. Para este tipo de carga se requiere una gran potencia debido a las limitaciones de tiempo [4].

**Carga dinámica:** se caracteriza por cargar las baterías mientras el autobús (en este caso trolebús) se desplaza conectado a cables aéreos o catenarias mediante un colector de corriente. El objetivo de este tipo de carga es que el bus se alimente por la energía almacenada en la batería en aquellos segmentos que no cuentan con cables aéreos [4].

**Carga en depósito:** en este esquema la batería sólo recibe carga en el tiempo en el que bus se encuentre durante la pausa de funcionamiento, es decir, que esté estacionado en patios. Generalmente es una carga mediante un conector manual. Esta carga generalmente se realiza en horas nocturnas, y se considera lenta por el tiempo que la batería se demora en llegar a un estado de carga óptimo para su funcionamiento. Por ende, dichos cargadores son de menor potencia [4].

### 1.9.2. Carga de oportunidad

Uno de los grandes retos que enfrenta el uso de buses a batería, es el montaje y puesta en operación de la infraestructura de recarga de alta potencia necesaria para hacer posible el funcionamiento de una ruta 100% electrificada. Una medida clave para facilitar la implementación de sistemas de buses eléctricos de carga rápida es el establecimiento de interfaces estándar entre las estaciones de carga y los vehículos, abarcando la problemática de la vida útil de los elementos (baterías, cargadores e infraestructura complementaria) además de los inconvenientes que se podrían presentar si vehículos e infraestructura son de diferentes propietarios y operadores.

A nivel mundial se han propuesto varias interfaces entre los buses eléctricos y los sistemas de recarga de baterías, incluyendo esquemas inductivos y conductivos con brazos mecánicos y pantógrafos. A continuación se presentan algunos casos de éxito a nivel mundial de interfaces de conexión entre buses eléctricos y sistemas de carga:

- Opbrid: Esta empresa española usa pantógrafos de la industria ferroviaria para desarrollar cargadores de oportunidad en paradas de autobuses. Junto con la empresa Iveco lograron ejecutar un proyecto demostrativo de cargadores de oportunidad para buses a batería en la ciudad de Umea (Suecia), donde reducían costos de productos y mantenimiento. Este sistema se caracteriza por un brazo mecánico en el techo del bus

que se conecta a un par de contactos fijos en las paradas para realizar la recarga. En la Figura 15 se aprecia el tipo de tecnología desarrollado por estas dos grandes industrias [31].



Figura 15. Autobús eléctrico Hybricon y sistema de barra deslizante Opbrid [50].

- La ciudad de Helsinki, mediante varios programas de I+D, ha impulsado la implementación de las tecnologías de buses eléctricos. En compañía de las empresas Linkker y Heliox, la ciudad ha promovido el desarrollo de la infraestructura vehicular eléctrica y ha introducido estaciones de carga para pantógrafos instalados en el techo de los autobuses, como se observa en la Figura 16. Esta asociación de empresas fue exitosa a tal punto que entregaron sistemas de autobuses de carga rápida en ciudades como Turku (Finlandia) y Copenhague (Dinamarca) [31].



Figura 16. Bus eléctrico Linkker y estación de carga rápida en Espoo, Helsinki [51]

- Gotemburgo fue la ciudad pionera para los sistemas de buses híbridos-eléctricos. En esta ciudad, las compañías Volvo y Opbrid decidieron implementar un proyecto demostrativo con tecnología de cargadores de oportunidad, que se diferencia de sistemas previamente desarrollados por la compañía Opbrid, en que el pantógrafo se encuentra en la estación, y se conecta a dos contactos fijos sobre el techo del bus. Otra característica diferenciadora de este proyecto es que algunas de sus instalaciones se encuentran en zonas completamente cubiertas. Gracias a esta demostración, se concluyó que los sistemas de carga rápida tenían viabilidad técnica, y facilitaban una significativa reducción del combustible y del uso de energía [31].



*Figura 17. Autobús híbrido de Volvo y sistema de carga de pantógrafo deslizante de Opbrid en Gotemburgo [52].*

- Después del éxito que se obtuvo en Gotemburgo, Volvo aprovechó su experiencia y se asoció con la autoridad de transporte público Hinchbahn y Siemens para implementar un sistema de carga con un pantógrafo invertido. ABB, otro de los grandes fabricantes de equipos eléctricos, formó una asociación estratégica con Volvo para entregar más estaciones de carga para Gotemburgo. Con estos grandes inversionistas se creó la plataforma de interfaz abierta de carga rápida basada en la solución de pantógrafo invertido denominada OppCharge, la cual tiene como objetivo estandarizar el tipo de carga y los autobuses que se usan y que así no existiera un monopolio entre las autoridades de transporte público o fabricantes de autobuses [31].

Todos estos tipos de alternativas se desarrollan gracias al impulso logrado en ciudades como Umea, Helsinki, Copenhague, Gotemburgo, y Estocolmo, cuyo trabajo por volverse regiones con menos contaminación y ruido, ha aportado en el ámbito de I+D y ha contribuido a

estandarizar una interfaz que permita que otros vehículos comerciales puedan utilizar la infraestructura.

### 1.9.3. OPPCharge

Es una solución técnica para cargar baterías de vehículos híbridos y eléctricos. Implementa un principio de carga por oportunidad, considerando el método más eficiente en términos de costo y energía para mantener los vehículos propulsados eléctricamente de manera óptima, bajo estándares industriales establecidos, con la intención de que la interfaz sea compatible con vehículos comerciales, siempre en búsqueda de una solución de transporte sostenible [53].

El protocolo OppCharge presenta los siguientes beneficios [54]:

- Evita conflictos entre soluciones paralelas de implementación de vehículos eléctricos.
- Facilita la interoperabilidad, es decir, que cualquier marca de vehículo puede conectarse a cualquier estación de carga.
- Al ser un estándar para cargadores de oportunidad, ofrece una mayor competencia, sana y justa.
- El peso de los rieles del conector que debe ser instalado en el vehículo es de 15 kg, lo que indica un impacto mínimo en la capacidad de los pasajeros.
- El cargador denominado OppCharge, es un cargador en poste que elimina el pantógrafo como instalación del bus.
- En lo referente a inversión, en comparación con los equipos de carga tradicionales, esta nueva tecnología ofrece una disminución de costos totales para el equipo de carga.
- Elimina las vibraciones mecánicas y gracias a la estructura de techo que posee, protege al vehículo de las inclemencias del clima.
- Proporciona una larga vida útil y un tiempo de inactividad mínimo que se podría aprovechar en las paradas.
- El montaje del poste minimiza la cantidad requerida de pantógrafos para una flota de autobuses determinada y reduce el costo total para el equipo de carga.
- El pantógrafo tiene un registro de un siglo de ser completamente confiable. Esta solución técnica simple proporciona una larga vida útil y un tiempo de inactividad mínimo. La confiabilidad de la carga conductiva se ve reforzada por la disposición del riel.
- Uno de los ítems más importantes es la actuación de los cargadores. OppCharge tiene un diseño de acuerdo con los estándares establecidos para la carga de corriente continua de alta corriente. Clasifica actualmente sus cargadores en 150, 300 y 450 kW. La corriente de carga se controla de acuerdo con IEC 61851, partes 1 y 2 (sistema de carga conductiva del vehículo eléctrico).

En la Figura 18 se observa el esquema de carga OPPCharge el cual cuenta con un brazo invertido y un par de rieles que se instalan en la carrocería del bus.

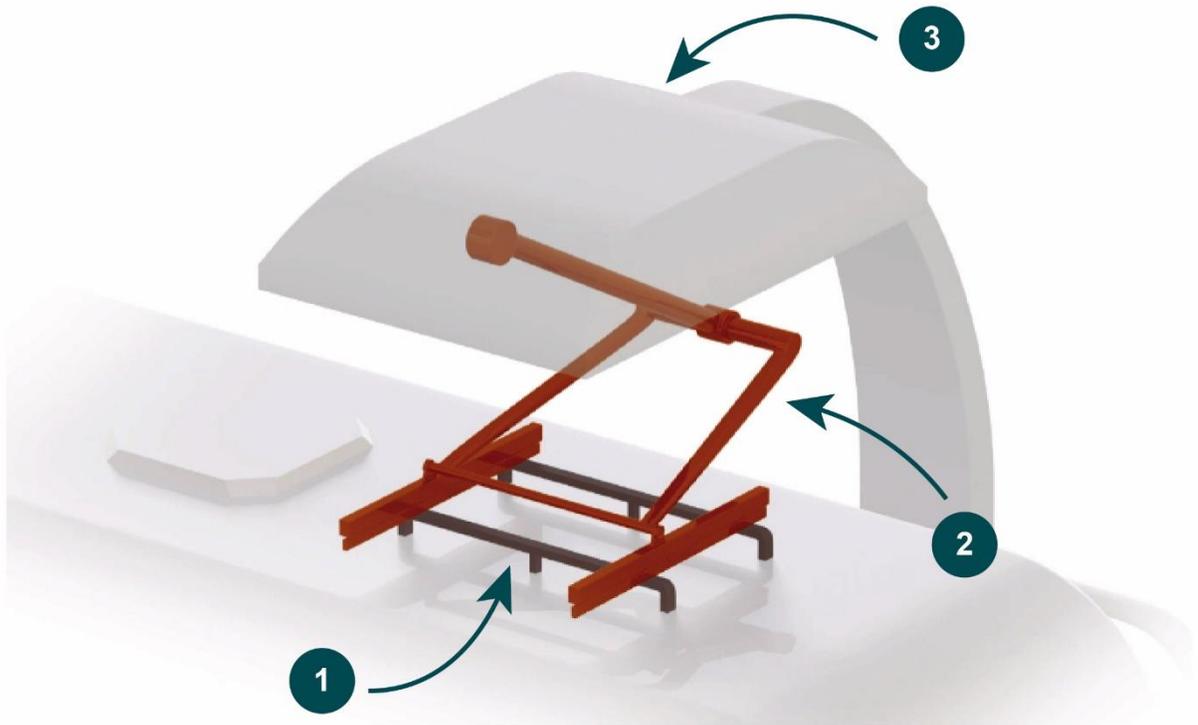


Figura 18. Esquema de recarga OppCharge [54]

1. Rieles en el bus
2. Pantógrafo invertido o brazo mecánico
3. Infraestructura de soporte de brazo mecánico

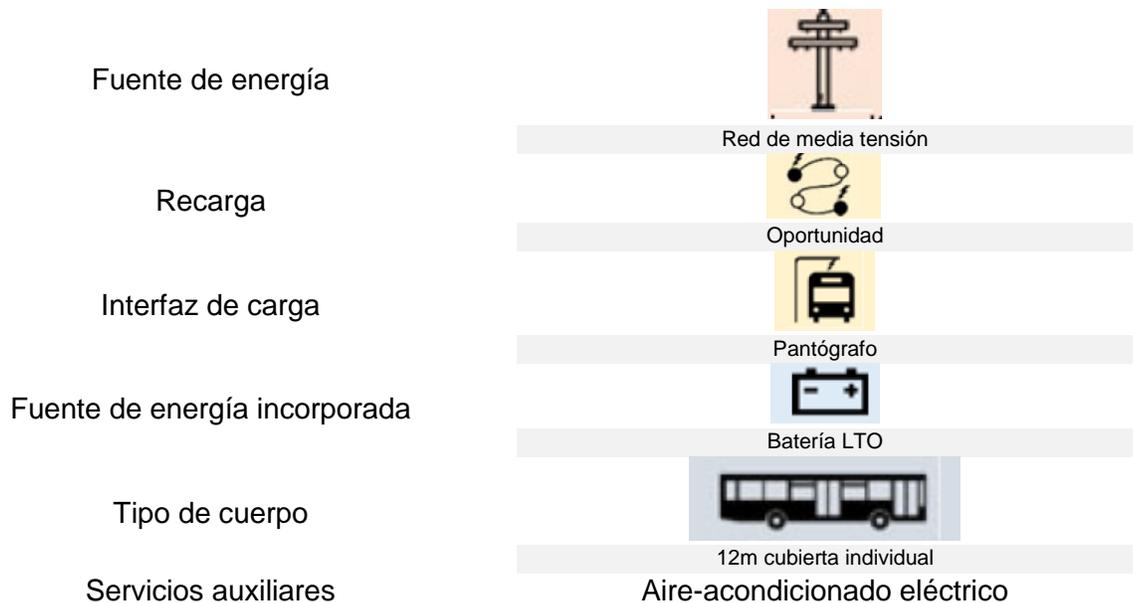
### 1.10. Funciones y opciones tecnológicas

Como se describió en los anteriores ítems, existe una gran variedad de tecnologías con la que se puede electrificar rutas de buses urbanos. En la Figura 19 se presenta una matriz morfológica en donde se encuentran los requerimientos tecnológicos y sus posibles soluciones. Dicha matriz funciona con la intersección de las funciones y las soluciones, con estas últimas se buscan los caminos más factibles o los resultados óptimos que permitan obtener un producto tecnológicamente bien desarrollado.

Función	Opciones					
	Red				Almacenamiento Local	
Fuente de Energía	Voltaje Bajo	Voltaje Medio	Voltaje Alto	Carril	Batería Estacionaria	Tanque H <sub>2</sub>
Carga / Estrategia de Repostaje	Oportunidad	En movimiento	Depósito			
Carga / Interfaz de Repostaje	Manual (enchufe, boquilla de bomba)	Pantógrafo	Iniciación	Colector de corriente de trolebús	Intercambio de Batería	
Fuente de Energía a bordo	Batería			Condensador	Tanque H <sub>2</sub> (+ Pila de Combustible)	Ninguno
	NMC	LFP	LTO			
Motor de Conducción	Imán Permanente Sincrónico	Sincrónica Electrónicamente Excitada	Asincrónico	Renuencia Cambiada		
Topología de Unidad	Motor Central	Motor del Cubo en Rueda				
Tipo de Cuerpo	12 m Cubierta Individual	18 m Articulado	24 m bi-articulado	2 pisos		
Enfriamiento	Aire Acondicionado Eléctrico	Ninguno				
Calefacción	Calentamiento por Resistencia Eléctrica	Bomba de Calor Eléctrica	Calefacción de Combustible			

Figura 19. Matriz morfológica de las opciones disponibles en sistemas de buses eléctricos [4].

Para efectos de este trabajo de grado, que se desarrolla con base en tecnologías de batería, se optó por escoger las opciones que se presentan en la Figura 20, donde se puede observar que las principales funciones requeridas para una electrificación total de una ruta de autobuses son la fuente de energía, la estrategia de recarga, la infraestructura requerida para dicha estrategia, el respaldo de alimentación del autobús, el tipo de motor y la topología del mismo, el tipo de carrocería, y si los servicios auxiliares.



Motor principal	Asíncrono
Distribución de motores	Motor central

*Figura 20. Opciones seleccionadas modificada de [4] .*

Se escogen aquellos buses denominados de carga rápida o por oportunidad, los cuales poseen baterías relativamente pequeñas, se cargan con frecuencia unos minutos, y puede operar con cargadores en ruta o al final del recorrido.

## 2. METODOLOGÍA

Esta sección presenta la metodología para determinar la viabilidad técnica y analizar los costos generales de un sistema de transporte basado en autobuses eléctricos que se alimentan por medio de baterías de litio titanato y se recargan con cargadores rápidos de conexión automática en las estaciones, bajo un esquema de recarga de oportunidad. En los siguientes capítulos se aplica esta metodología al caso de la ruta Circular Sur 302, y se comparan los resultados para el caso de buses eléctricos duales bajo un esquema de carga dinámica [23].

La metodología para el desarrollo del presente trabajo se muestra en la Figura 21. En la etapa 1 de la metodología se realiza una búsqueda de información utilizando las bases de datos Scopus, Web of Science e IEEE, entre otros motores de búsqueda, sobre temas relacionados con buses eléctricos, esquemas de carga y baterías de tecnología litio titanato; obteniendo así los artículos necesarios para el sustento del trabajo de grado. Después se efectúa la parametrización de la ruta Circular Sur 302 desde la información obtenida del programa Google Earth, y se caracterizan los buses de la ruta utilizando sus datos técnicos. Posteriormente, con toda la información sobre la ruta y las características técnicas de los buses, se desarrolla una simulación en el software Open Track que permite, mediante la herramienta matemática Matlab, analizar el consumo energético de toda la flota de la ruta evaluada, determinar cuáles son los puntos adecuados para la instalación de puntos de recarga de oportunidad que permitan una operación continuada de la ruta de buses, y establecer la capacidad de las baterías que se deben implementar para el recorrido. En la siguiente etapa se analizan y comparan los costos de buses eléctricos de batería con carga de oportunidad, y buses eléctricos duales bajo un esquema de carga dinámica, y por último, se plantean las conclusiones a partir de los resultados obtenidos.

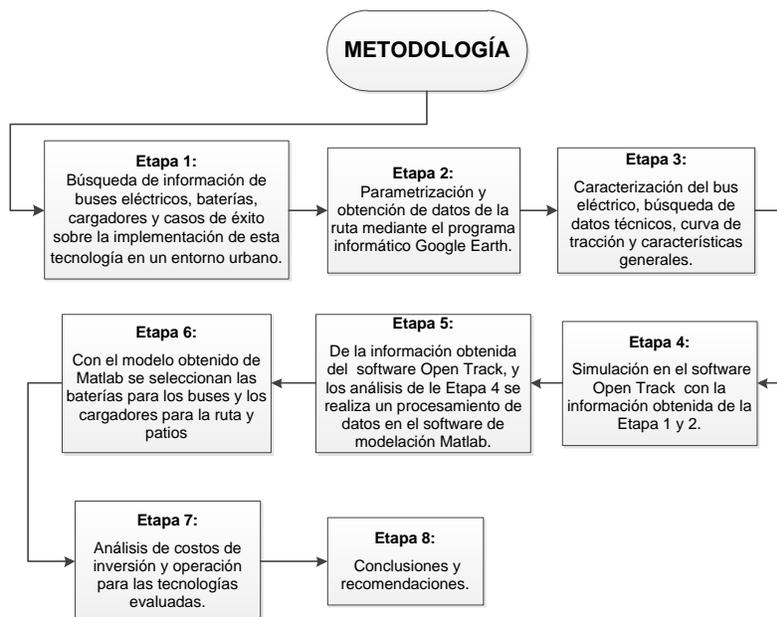


Figura 21. Metodología propuesta para el desarrollo del proyecto

El análisis técnico de este trabajo de grado se realiza con base en la modelación y procesamiento de datos según las características y parámetros técnicos de los buses evaluados y la ruta implementada. A continuación se describen los elementos que fueron de vital importancia para la realización de este estudio.

## 2.1. Software

### 2.1.1. Software de modelación Open Track

OpenTrack es un software que inició como un proyecto de investigación para los ferrocarriles suizos, con el objetivo de construir un modelo que permitiese emular el comportamiento ferroviario. Sin embargo, también es usado por consultoras y universidades que realizan diversas tareas de análisis de sistemas de transporte ferroviario, entre las que se encuentra:

- Determinar las necesidades para una infraestructura ferroviaria.
- Analizar la capacidad de infraestructuras y estaciones.
- Estudios de reservas de material rodante.
- Programación y análisis de horarios.
- Analizar los efectos de fallos del sistema (como fallos de infraestructura o de trenes) y retrasos.
- Calcular el consumo de potencia necesario para los servicios ferroviarios.
- Simulación de sistemas de levitación magnética.

En la Figura 22 se presenta los módulos de simulación que posee el programa OpenTrack.

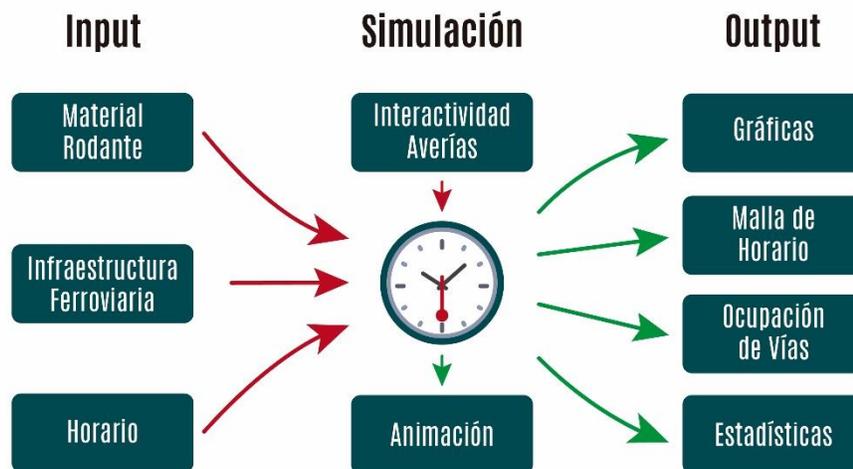


Figura 22. Componentes de la herramienta de simulación Open Track [55].

Como se observa en la anterior figura, se debe tener en cuenta como datos de entrada:

- Material rodante: Son las características generales del vehículo, como: tamaño, peso, medidas, curva de tracción, voltaje de alimentación, velocidad máxima, velocidad nominal y factor de adherencia, entre otros.
- Infraestructura ferroviaria: Son las características del terreno o ruta, que incluye curvas, radios de curvatura, pendientes, velocidades permitidas, y señalización.
- Horarios: Durante la simulación, los trenes tratan de cumplir el horario establecido para las salidas y paradas en estaciones, lo cual se expresa como una restricción para las diferentes ecuaciones de movimiento del tren en términos de velocidad y distancia.
- Se debe tener información sobre datos específicos de la tecnología que se va a usar como fuente de alimentación principal del bus. En el caso particular de buses a batería, se debe considerar la potencia de carga, el tipo de batería, la función de carga y descarga.

Los resultados que ofrece la simulación en OpenTrack dan la información necesaria para saber cuáles son los puntos indicados para instalar los cargadores que permitan el funcionamiento adecuado del bus eléctrico.

### **2.1.2. Software de modelación MATLAB**

Es un software matemático que integra un entorno de desarrollo con un lenguaje de programación propio, y que permite analizar datos, desarrollar algoritmos, crear modelos, y automatizar muchos procesos de trabajo.

Además de realizar 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.

Uno de los ítems más importantes que se puede abordar con esta herramienta es el análisis de datos. Este software permite acceder a bases de datos desde una amplia variedad de fuentes y puede escalar a clústeres, nubes y plataformas de big data, permitiendo así desarrollar aplicaciones propias para el análisis de información [56].

En la Figura 23 se presenta un esquema representativo de cómo MATLAB se comunica con diferentes fuentes de datos.

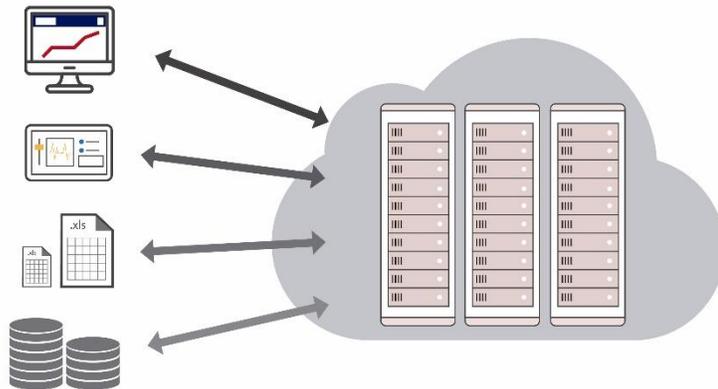


Figura 23. Análisis de datos con MATLAB [56]

Para el presente trabajo de grado se escogió este software matemático con el fin de realizar el análisis y modelamiento de los datos de la ruta, y convertirlos en información procesable. Partiendo de los resultados obtenidos con el programa Open Track, se elaboró un modelo de análisis en Matlab para determinar los consumos energéticos de la flota que opera en la ruta Circular Sur 302, dimensionar las baterías de cada bus, y calcular su estado de carga en función de varios escenarios operativos.

## 2.2. Cálculo de esfuerzo 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 [57]:

- 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.

### 2.2.1. Resistencia al avance

Esta resistencia depende de varias propiedades del vehículo, incluyendo tipo, masa, velocidad, aerodinámica, y otros factores internos. Esta resistencia, debida al movimiento, se encuentra presente en todo el trayecto, independiente de si es recto, curvo o con alguna pendiente [57].

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:

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

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.

### 2.2.2. 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), y su valor está dado por la siguiente ecuación:

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

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>].

### 2.2.3. Resistencia por pendiente

La resistencia debida a la pendiente depende del peso del vehículo en su componente paralelo al sentido de la vía.

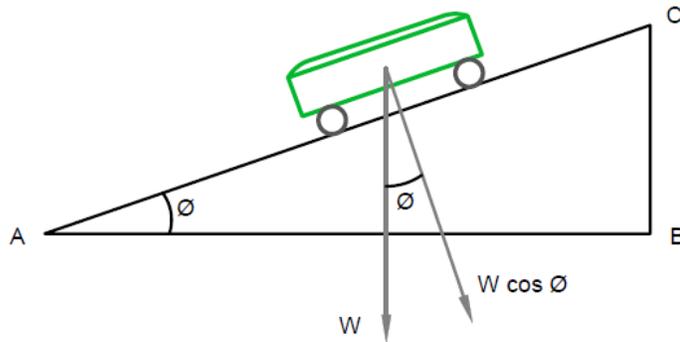


Figura 24. Descomposición de la masa del tren en una componente normal y una componente paralela a la vía [57]

Con base en el esquema presentado en la Figura 11, la resistencia debida a la pendiente está dada por:

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

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:

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

#### 2.2.4. 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 25 se puede apreciar el esfuerzo de tracción no uniforme de un motor diésel resultante de los cambios que tiene el motor [58].

Por otro lado, los motores eléctricos tienen la capacidad de generar torque a velocidad cero, como se presenta en la Figura 25.

Curva de tracción para motor diésel      Curva de tracción para motor eléctrico

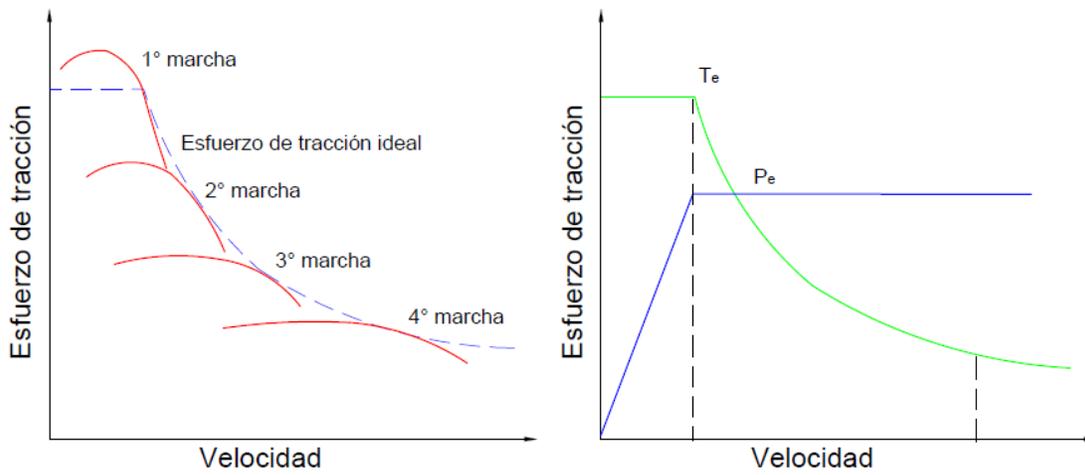


Figura 25. Curva de tracción para motor diésel y motor eléctrico [58]

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 la manera de calcular la velocidad angular del motor, asumiendo una velocidad angular de la rueda, y conociendo la relación de transmisión del motor.

$$\omega_{mr_{motor}} = \omega_{mr_{rueda}} \cdot rt \quad \text{Ecuación 5}$$

donde:

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

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

$rt$ : Relación de transmisión

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

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

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.

$$P_{motor} = T_{motor} \cdot \omega_{mr_{motor}} \quad \text{Ecuación 7}$$

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.

$$T_{rueda} = T_{motor} \cdot r t \quad \text{Ecuación 8}$$

donde:

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

$rt$ : Relación de transmisión

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.

$$F_{rueda} = \frac{T_{rueda}}{R} \quad \text{Ecuación 9}$$

La curva de torque nos da información de cómo es la relación de fuerza y velocidad que posee el motor evaluado, puesto que el torque es una magnitud física que mide el momento de fuerza que se ha de aplicar a un eje que gira sobre sí mismo a una determinada velocidad. En términos automotrices, es la fuerza necesaria para que mueva el eje y así se transmita dicho movimiento al resto de elementos mecánicos necesarios para desplazar al vehículo.

### 2.3. Estimación de costos

La tecnología de tracción en los diferentes medios de transporte masivo se ha venido desarrollando durante años, estandarizando así cierto tipo de motores y variadores de velocidad para reemplazar los sistemas basados en la conmutación. Los fabricantes de buses eléctricos han optado por tecnologías emergentes, como por ejemplo los motores de imán permanente de alta potencia, haciendo que este tipo de vehículos sean más competitivos a nivel del mercado. Sin embargo, aún se tiene una barrera en su implementación, puesto que existe una imagen antigua donde se piensa que los costos de inversión son excesivamente altos.

Uno de los principales limitantes es que, aunque muchas empresas están incursionando en el desarrollo de buses eléctricos, su fabricación no es masiva. Sin embargo, con el alza del petróleo y la escasez del gas, se han incrementado los costos operativos de los sistemas basados en este tipo de alimentación. Por otro lado, para el ámbito colombiano, es un punto a favor para alimentación por energía eléctrica puesto que la matriz energética del país tiene un alto componente hidráulico, manteniendo así un comportamiento estable de los precios durante la mayor parte del año, esperando variabilidad de estos solo en los meses en los que se presente fenómeno del niño. Todos estos elementos, sumados a los impactos negativos que puede producir la operación de medios de transporte con base en diésel, como se ha

mencionado previamente, despiertan un interés por demostrar que la adquisición de tecnologías alternativas tiene un costo asequible.

Lo descrito anteriormente motiva a realizar una estimación de costos para las tecnologías evaluadas, es decir, sistemas de transporte mediante buses eléctricos de batería y duales, que podría servir de punto de partida para un trabajo posterior que elabore un análisis financiero completo y compare estas alternativas tecnológicas con diferentes tipos de sistemas de transporte público.

A continuación se presentan los elementos considerados para estimación de costos de electrificación de la ruta bajo análisis [59]:

- Costos energéticos: para este análisis, esta categoría cubre exclusivamente los costos de energía eléctrica, puesto que esta es la principal y única fuente de alimentación de los buses eléctricos.
- Salarios operativos: son aquellos asociados a la operación de los vehículos, los cuales incluyen el valor a pagar a los conductores, y un factor por prestaciones sociales.
- Salarios administrativos: son aquellos referenciados al personal que pertenece a la entidad administrativa de las empresas de transporte. Su cálculo se realiza estimando cuántas personas del área administrativa se necesitan por bus, y al igual que en los salarios operativos, va sujeto a un factor de prestaciones sociales.
- Inversiones: es el monto inicial que el transportador o inversionista de la flota debe suministrar al proyecto para poder adquirir equipos e infraestructura y poner la ruta en servicio.
- Costos administrativos: son aquellos que se deben pagar por el hecho de circular en la ciudad, como lo son el seguro obligatorio de accidentes de tránsito, seguro de daños y responsabilidad civil, impuesto de rodamiento de vehículos, entre otros.

### **3. ANÁLISIS TÉCNICO**

Para establecer la viabilidad técnica de la tecnología de buses a batería de litio titanato, se realiza un análisis basado en varios casos de estudio, teniendo en cuenta las simulaciones realizadas en Open Track y el procesamiento de datos de Matlab. A continuación se describen los datos de entrada para el análisis técnico, y los resultados obtenidos.

#### **3.1. Datos de entrada**

##### **3.1.1. Características de la ruta Circular Sur 302**

Es una ruta que circula por el occidente, centro, oriente y sur de la ciudad de Medellín. Hace un recorrido de aproximadamente 21,8 km, pasando por algunas de las principales vías de la ciudad, entre ellas la Avenida del Ferrocarril, Avenida Oriental, Avenida Las Vegas, La Avenida 80 y Calle 44 San Juan. La ruta entra en circulación a principios de los ochenta y aún mantiene el mismo recorrido, que es igual al Circular Sur 303 pero en sentido contrario. Esta rutas son administradas por las empresas Santra, Cootrabel, Coonatra, Sotrames y Autobuses El Poblado-Laureles y pueden transportar hasta 20.000 pasajeros al día. La ruta 302 es una de las más concurridas en la ciudad por su extenso recorrido a través de la zona urbana, y actualmente cuenta con una gama de buses alimentados con derivados del petróleo, lo que ofrece posibilidades para cambios a tecnología eléctrica, como se plantea en este trabajo.

La frecuencia de salida de los buses es de dos o tres minutos, por lo cual es frecuente que se encuentren varios buses durante el recorrido debido a las congestiones. Las rutas de buses de transporte público como la Circular Sur 302 pueden operar a una velocidad máxima de 60 km/h y 30 km/h en zonas estudiantiles, lo que se incluye como un parámetro en las simulaciones con Open Track.

En la Figura 26 se puede apreciar el recorrido que realiza la ruta Circular Sur 302.



Figura 26. Recorrido Circular Sur 302 [60]

Las características propias de la ruta se presentan de la Tabla 2 a la Tabla 5. En estas tablas se incluye las horas de operación diarias, el tiempo de espera en las paradas, el tiempo promedio que demora un solo bus realizando la totalidad del recorrido, y los despachos de la flota de buses, entre otros factores.

Tabla 2. Características generales de la ruta Circular Sur 302.

EMPRESA	NOMBRE	TIPO DE RUTA	TIPO DE VEHÍCULO	CAPACIDAD	LONGITUD	FRECUENCIA	VELOCIDAD	TIEMPO DE VIAJE (min)
Santra - Cootrabel - Coonatra - Sotrames	Circular derecha	directa	BUS	60	20,93	32,0	12,60	99,7

Tabla 3. Características técnicas de la ruta Circular Sur 302.

FLOTA TÉCNICA	FLOTA LEGAL	DESPACHOS						DESPACHOS DÍA	KM/DÍA
		VALLE AM	PICO AM	VALLE	VALLE PM	PICO PM	VALLE PM		
54	62	16	64	136	34	64	64	378	7904

Tabla 4. Características de los despachos.

DESPACHOS	VALLE AM	PICO AM	VALLE	VALLE PM	PICO PM	VALLE PM
RANGOS DE HORARIOS	4 a 5 am	5 a 7 am	7 am a 3:30 pm	3:30 a 5 pm	5 a 7 pm	7 a 11 pm
DURACIÓN	1 hora	2 horas	8,5 horas	1,5 horas	2 horas	4 horas

Tabla 5. Frecuencia de despacho.

DESPACHOS	VALLE AM	PICO AM	VALLE	VALLE PM	PICO PM	VALLE PM
INTERVALOS EN HORA PICO Y VALLE	Cada 3,75 min o 255s sale un bus	Cada 1,88 min o 112,5s sale un bus	Cada 3,75 min o 225s sale un bus	Cada 2,68 min o 160,7 sale un bus	Cada 1,88 min o 112,5s sale un bus	Cada 3,75 min o 255s sale un bus

### 3.1.2. Características del bus

Para obtener la simulación con el bus padrón, se parametrizan los datos de entrada del Open Track con las características de un trolebús padrón marca Vossloh Kiepe de Atenas, como se observa en la Tabla 6 .

*Tabla 6. Parámetros para un bus padrón [61].*

Parámetro	Dato
<b>Generales</b>	
Diseño	Trolebús de 2 ejes
Voltaje nominal	600 V <sub>DC</sub> (+25%, -30%)
Velocidad máxima	65 km/h
Velocidad promedio	20 km/h
Máxima aceleración	1,5 m/s <sup>2</sup>
Peso vacío	13 700 kg
Peso adherido	5 800 kg
Peso neto	19 500 kg
Número de pasajeros	84
De pie	27+1
Sentados	56
Longitud del vehículo	12 m
Ancho del vehículo	2,5 m
Alto 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	14 79 min <sup>-1</sup>
Voltaje nominal	420 V
Corriente nominal	351 A

La curva de tracción de este tipo de vehículo se presenta en la Figura 27. Para calcularla se utilizaron los datos de la Tabla 6.

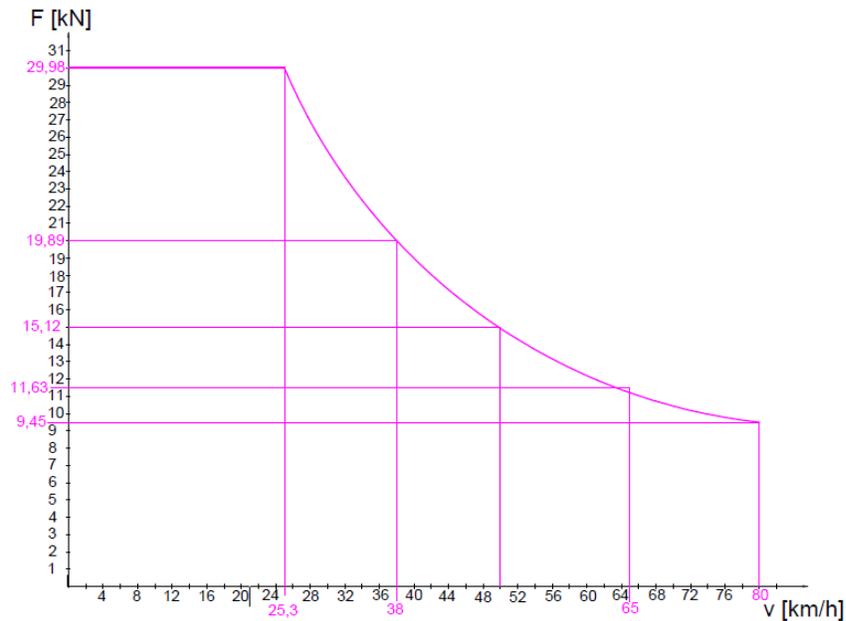


Figura 27. Curva de tracción de un bus padrón analizado.

### 3.2. Casos de análisis

El procesamiento de datos en Matlab se ejecuta considerando tres alternativas para la alimentación de las baterías durante el recorrido de la ruta, como se describe a continuación:

- Caso 1: Cuenta con 4 cargadores durante todo el recorrido de la ruta.
- Caso 2: Cuenta con 2 cargadores durante todo el recorrido de la ruta.
- Caso 3: Cuenta con 3 cargadores durante todo el recorrido de la ruta.

Esta división entre diferentes casos se plantea con el fin de determinar la viabilidad técnica de diferentes opciones de sistemas de carga en cuanto a potencia y cantidad. Igualmente, para facilitar la ubicación de los cargadores y la comparación con el estudio de buses duales realizado por Briñón [23], se fracciona el recorrido de la ruta en segmentos, de la siguiente manera:

Tabla 7. Segmentación de la ruta

Nombre	Longitud [m]	Ubicación entre paraderos
Segmento 1	1 576	P1-P3
Segmento 2	3 571	P3-P4
Segmento 3	1 721	P4-P7
Segmento 4	3 481	P7-P8
Segmento 5	1 308	P8-P11
Segmento 6	1 795	P11-P12
Segmento 7	4 102	P12-P14
Segmento 8	3 383	P14-P15

### 3.3. Consumos energéticos

Al llevar a cabo las simulaciones en Open Track se obtuvo, para un bus eléctrico operando sobre la ruta Circular Sur 302, una serie de datos de salida que incluyen el tiempo del recorrido, la distancia, la velocidad, la aceleración, el esfuerzo de tracción, la potencia mecánica, la potencia eléctrica de entrada, y el consumo de energía. Al analizar estos datos se observa que para el esfuerzo de tracción existen unos valores negativos que el software no incluye en el cálculo de energía total. Sin embargo, para el caso del modelo planteado en este trabajo de grado, es necesario realizar el cálculo de la energía consumida teniendo en cuenta el consumo energético durante la tracción y la generación que se presenta por un frenado regenerativo.

Para realizar el mencionado cálculo, se hizo un análisis de la potencia eléctrica a partir de la potencia mecánica, considerando las eficiencias tanto del motor como del inversor. En la Figura 28 se presenta la configuración típica para un bus eléctrico alimentado sólo con batería. .

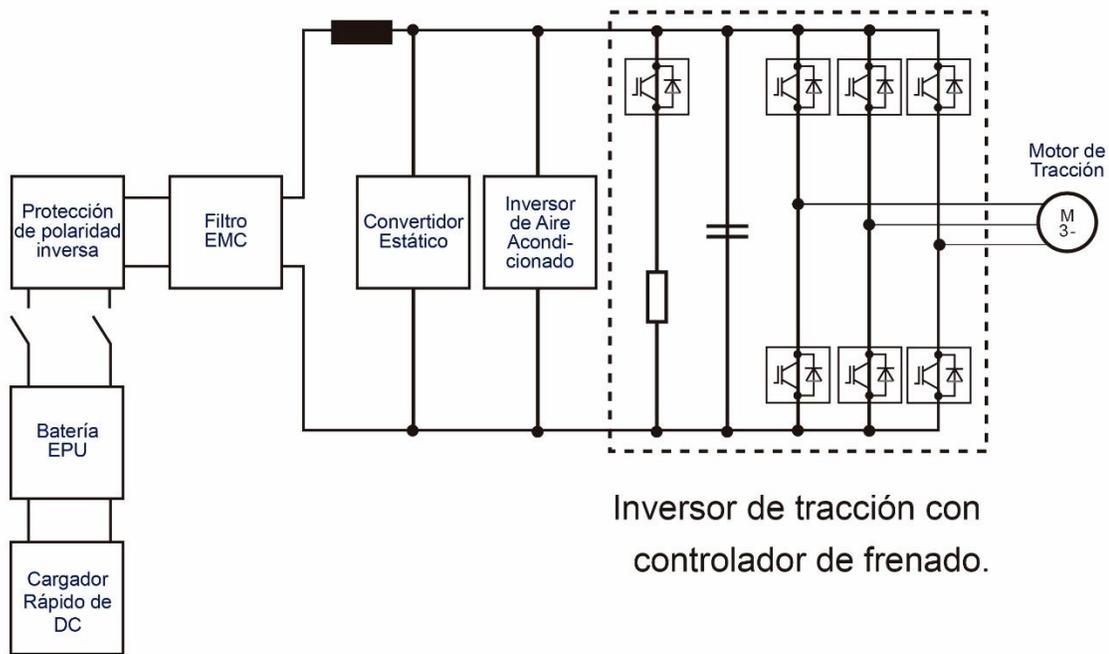


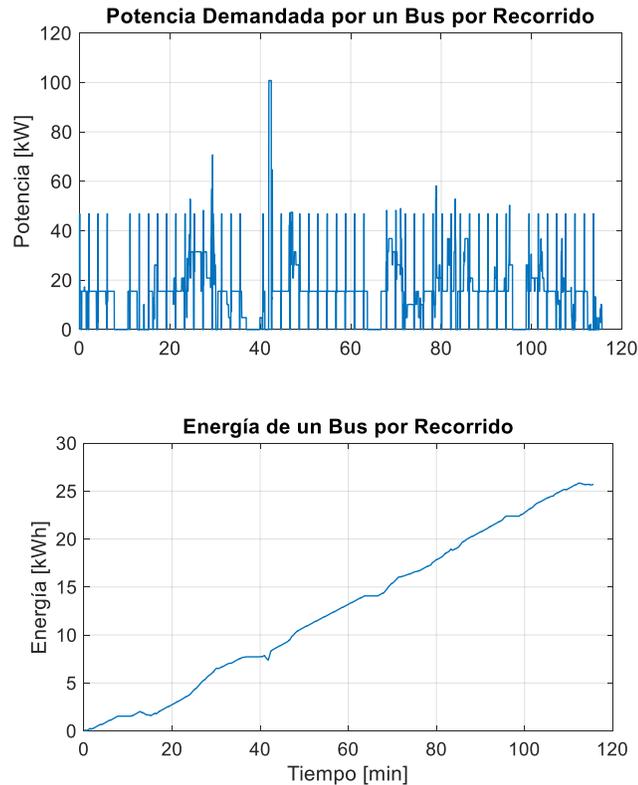
Figura 28. Esquema de circuito de potencia para bus eléctrico alimentado por batería [61].

Para el caso del motor se pudo apreciar que las eficiencias varían entre los valores de 85% a 95% [62] por lo cual, con el fin de utilizar un dato conservativo, se considera una eficiencia del motor del 90% [63]. Para la parte de inversores se consideró una eficiencia de 96%, como se reporta en algunos catálogos técnicos [64].

#### 3.3.1. Consumos energéticos para un bus

Con el Open Track se obtienen los datos de energía consumida para un vehículo, a partir de los cuales se calcula la energía total de un autobús en el día de operación, teniendo en cuenta los

despachos. En la Figura 29 se puede apreciar la potencia demandada por el vehículo durante el trayecto de la ruta y el consumo de energía de un bus en un recorrido completo. Adicionalmente, la Figura 30 presenta la posición del bus según los segmentos definidos, mostrando así en cual sector se encuentra el autobús y en qué tiempo del recorrido.



*Figura 29. Potencia de un bus en un recorrido de la ruta, Consumo energético de un bus en un recorrido completo*

A partir de la Figura 29 se aprecia que la energía total que necesita un solo bus para todo su recorrido es de 25,68 kWh, para una distancia de 20,937 km, lo que se traduce en un consumo promedio de 1,23 kWh/km, dato típico de consumo reportado para buses padrones [4]. Es de resaltar que en este análisis se tiene en cuenta el frenado regenerativo que puede producir el bus durante el trayecto.

En la Figura 30 se puede observar la distancia recorrida por bus entre los cargadores definidos para cada uno de los casos. Se distinguen en las tres gráficas que existen pequeños tramos horizontales que interrumpen la continuidad de la línea, los cuales representan los diferentes puntos de recarga en la ruta. Calculando la distancia entre estos puntos se puede estimar la frecuencia de parada de los buses y obtener información útil para determinar la potencia que deben tener los cargadores.

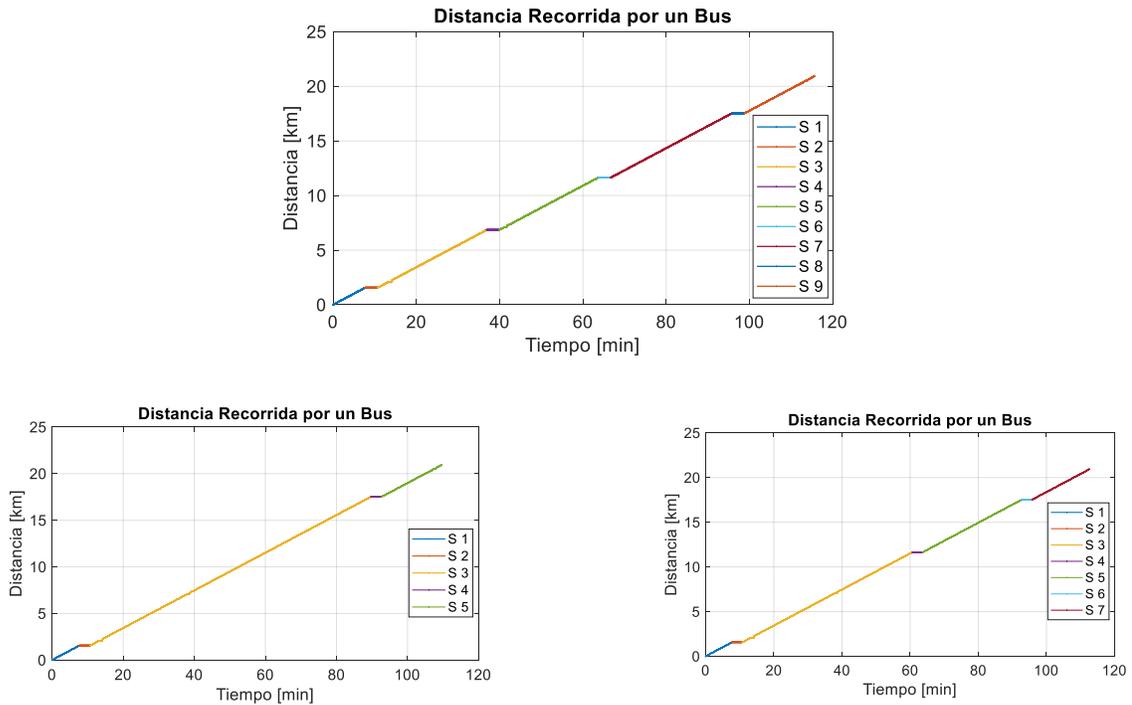


Figura 30. Distancia recorrida por segmento entre cargadores Caso 1, 2 y 3

### 3.3.2. Consumos energéticos para la flota de buses completa

Para complementar el análisis descrito en la sección anterior, se calcula el consumo energético de todos los buses en un día de operación, con el fin de analizar el comportamiento de la flota y dimensionar los cargadores y baterías necesarios para suministrar la potencia requerida.

En este caso se tienen en cuenta los despachos reales de la flota durante el día, como se presentó en la Tabla 5 y se considera un tiempo de carga de 3 minutos en cada parada de cargador. Desde la Figura 31 hasta la Figura 33 se presentan los despachos del bus 1 y el bus 63 durante todo el recorrido en un día, para los tres casos de estudio. Estas curvas ofrecen información de cómo es la distribución espacio-temporal de los buses, el desplazamiento que tienen durante el día y el impacto de los tiempos de parada para realizar abastecimiento de energía en cada uno de los cargadores de los diferentes casos propuestos.

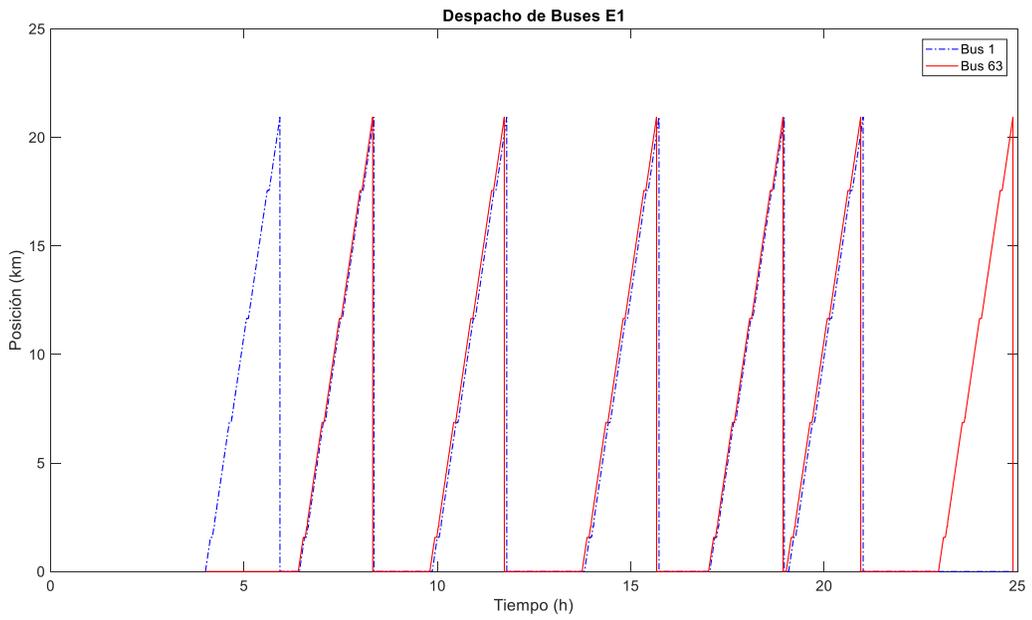


Figura 31. Posición de los buses en el transcurso del día-Caso1

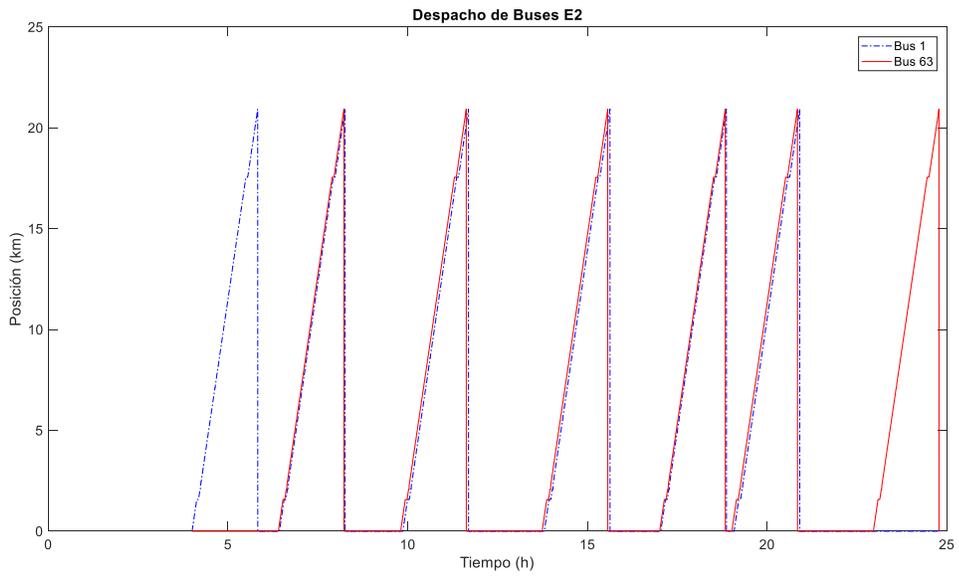


Figura 32. Posición de los buses en el transcurso del día-Caso2

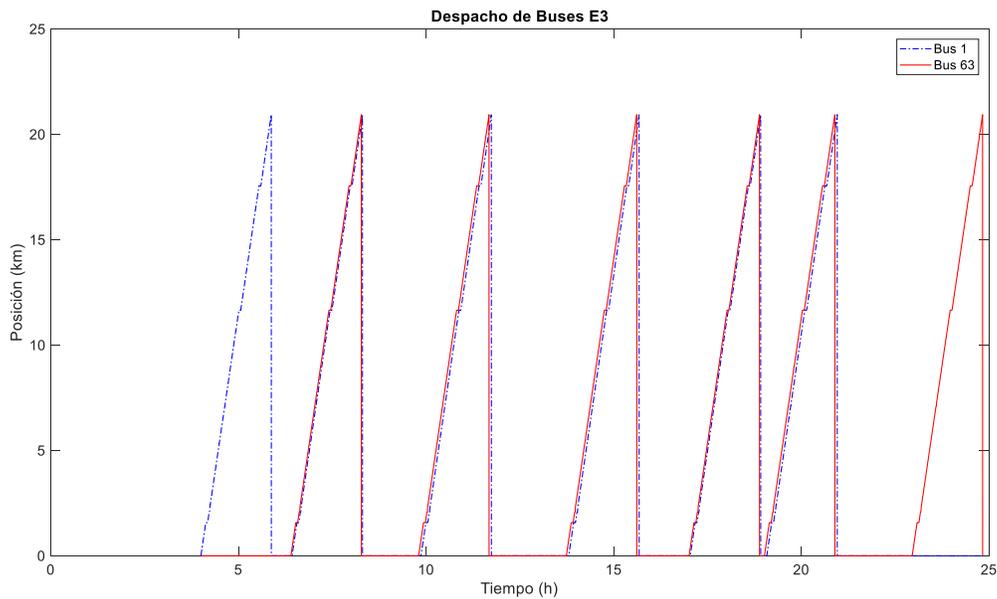


Figura 33. Posición de los buses en el transcurso del día-Caso3

En la Figura 34 se presenta la curva de potencia total de la flota en un día completo. En esta figura se puede apreciar que la potencia pico de toda la flota excede 1 MW en las horas de la mañana, y que durante las horas valle la potencia se encuentra entre aproximadamente 250 kW y 565 kW.

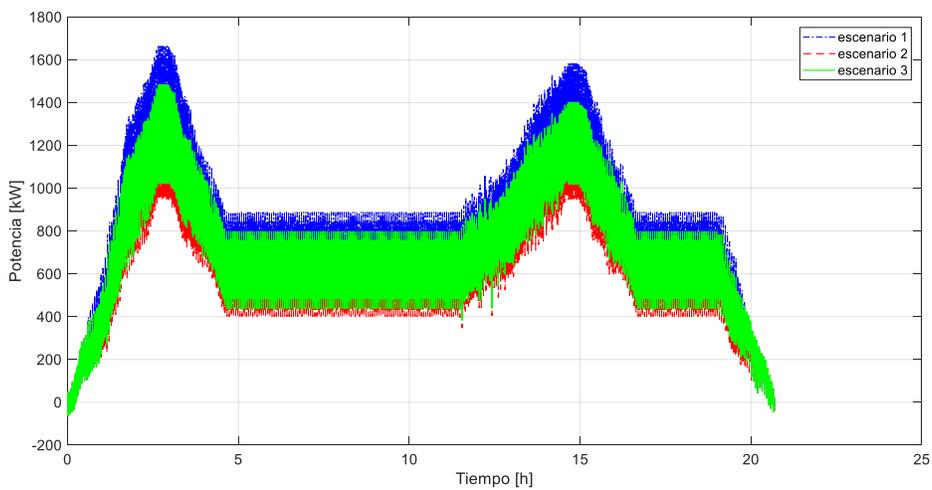


Figura 34. Curva de potencia total de la flota en un día completo de operación.

Con base en los datos de la figura anterior es posible elaborar la gráfica de consumo de energía total de la flota para un día completo que se presenta en la Figura 35. Con base en esta figura, el consumo energético total de la flota durante un día de operación asciende a 9.707 kWh; dicho valor es importante para el cálculo de costos energéticos que implica la operación de los buses, como se observa más adelante en los análisis de costos en la Tabla 14.

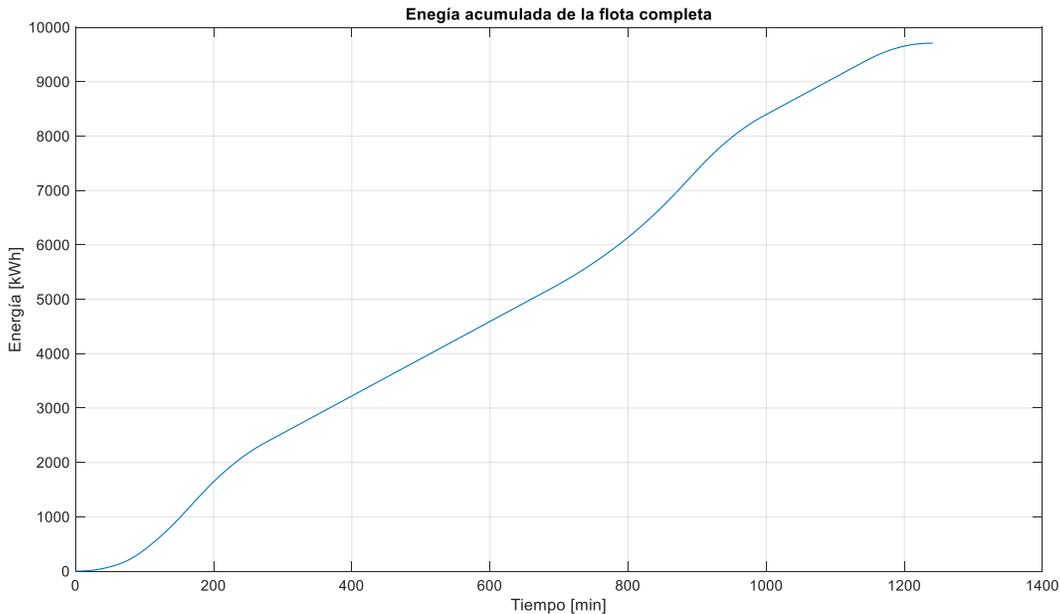


Figura 35. Consumo energético de un bus en un recorrido completo.

### 3.3.3. Frenado regenerativo logrado

Otro de los análisis relevantes de este estudio es la posibilidad de la recuperación de energía por medio del frenado, puesto que los vehículos eléctricos suelen contar con un sistema de frenado regenerativo, es decir, cuando el vehículo desacelera, el generador acoplado a la tracción inyecta energía a la batería, para que la energía almacenada sea utilizada posteriormente para alimentar al motor eléctrico.

Para el análisis del presente trabajo de grado se realiza la simulación de frenado regenerativo para los seis recorridos que ejecuta cada bus de acuerdo con los despachos de la flota, como se aprecia en la Figura 36. La energía total que se logra sólo con el frenado regenerativo en un día de operación para un bus presenta un valor de 14,79 kWh. La energía producida por este tipo de frenado es considerada durante el cálculo del estado de carga de las baterías.

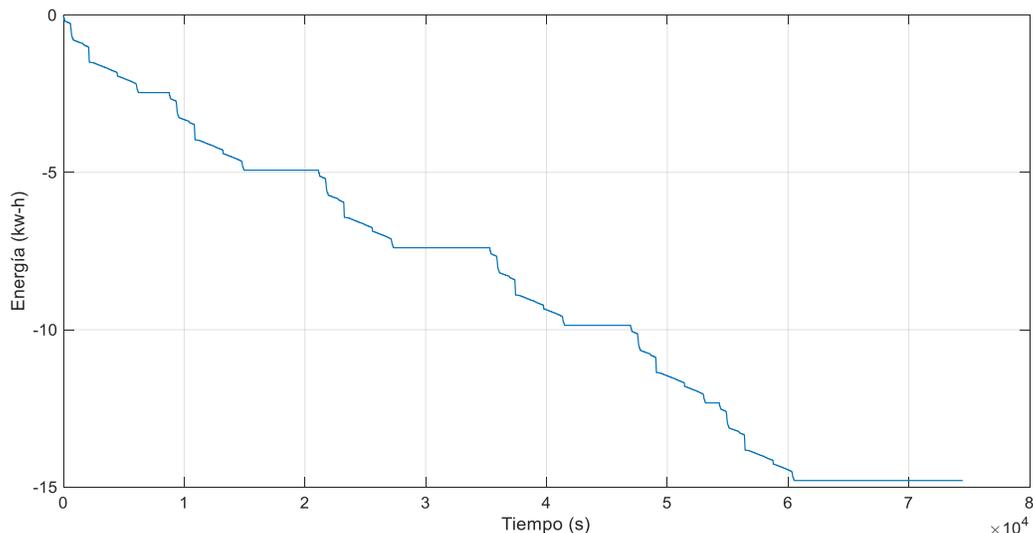


Figura 36. Energía diaria producida por un bus gracias al frenado regenerativo.

### 3.4. Selección de las baterías

Para seleccionar las baterías se tiene en cuenta la energía que se va a requerir en cada caso. Además, se considera el envejecimiento de las baterías, la cantidad de recorridos totales que realizan los buses al día, y la energía del segmento que más energía consume.

Se decide dimensionar la batería con una capacidad energética equivalente al consumo de dos recorridos completos, y se asume igual para los 3 casos de estudio. Este criterio es conservativo y busca garantizar una buena operación y un buen proceso de carga.

Otro factor que influyó en considerar la misma capacidad de baterías para todos los casos de estudio es que se pueden realizar comparaciones de los estados de carga para la batería según la disposición de los cargadores en ruta, con respecto a buses eléctricos duales de carga dinámica.

Un aspecto importante para la selección y dimensionamiento de la batería fue el factor de envejecimiento, pues al final de su vida útil, su rango operativo puede disminuir al 80% de su capacidad inicial. Por tal motivo, fue necesario sobredimensionar la batería teniendo en cuenta esta variable.

Teniendo en cuenta todos estos aspectos, la batería seleccionada fue de 64,2 kWh  $\approx$  65 kWh, como se describe en la Tabla 8.

Tabla 8. Selección de batería

Caso	Energía de 2 trayectos(kWh)	Factor de envejecimiento	Batería (kWh)
Casos 1, 2 y 3	51,36	1,25	65

### 3.5. Estado de carga de las baterías

Después de haber realizado el dimensionamiento de la batería según los criterios anteriormente mencionados, se realiza un análisis del estado de carga teniendo en cuenta los tres casos de estudio, con el fin de determinar cuál es el mejor escenario desde la parte técnica.

Este es el modelo de SoC que se utilizó:

$$SoC(t) = Soc(t - 1) - \frac{P(t) \times \Delta t}{CAP} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde

$SoC(t)$  es el estado de carga en un instante determinado

$CAP$  es la capacidad total de la batería

$P(t)$  es la potencia instantánea

$\Delta t$  es el diferencial de tiempo para el cálculo de energía

Para este análisis se determinó un estado de carga inicial para cada caso, dependiendo de la potencia de los cargadores en los tres escenarios de estudio. Para los casos 1 y 3 se seleccionaron cargadores de 150 kW, y para el caso 2 se seleccionaron cargadores de 200 kW, los cuales garantizan que los buses pueden operar continuamente durante toda la jornada sin sobrepasar el estado de carga mínimo de la batería.

Como se puede apreciar en la Figura 37, el caso en el cual se tienen en cuenta cuatro cargadores en ruta mantiene el estado de carga en una banda constante, debido a que las continuas recargas que hace el bus eléctrico permiten recuperar toda la energía consumida en la tracción. Se supuso un estado inicial del 80 % y termina al final del recorrido con un 92,73 %, lo que indica que no se necesitan cargadores en patio para recarga nocturna.

Para el segundo escenario, el cual cuenta con sólo dos cargadores, se asumió un estado de carga inicial del 100 % y una potencia de cargadores igual a 200 kW, valor que es superior a los otros dos casos para descartar que la batería se descargue por completo. Se observa en la Figura 37 que en este escenario el bus finaliza la operación con una carga final mucho menor, del 25,07 %, lo cual implica una infraestructura eléctrica adicional de recarga nocturna para alcanzar un estado de carga adecuado que le permita completar el circuito de la ruta por completo el siguiente día.

Por último se plantea el escenario 3, que cuenta con tres cargadores en ruta, mostrando un mejor comportamiento en comparación con los dos casos anteriores. Para este caso se asume el mismo estado de carga inicial del caso 1, es decir, un 80 %, y con la descarga descrita se llega a una carga final de 47,25 %, que representa una infraestructura eléctrica en patios que no es tan considerable como en el caso 2.

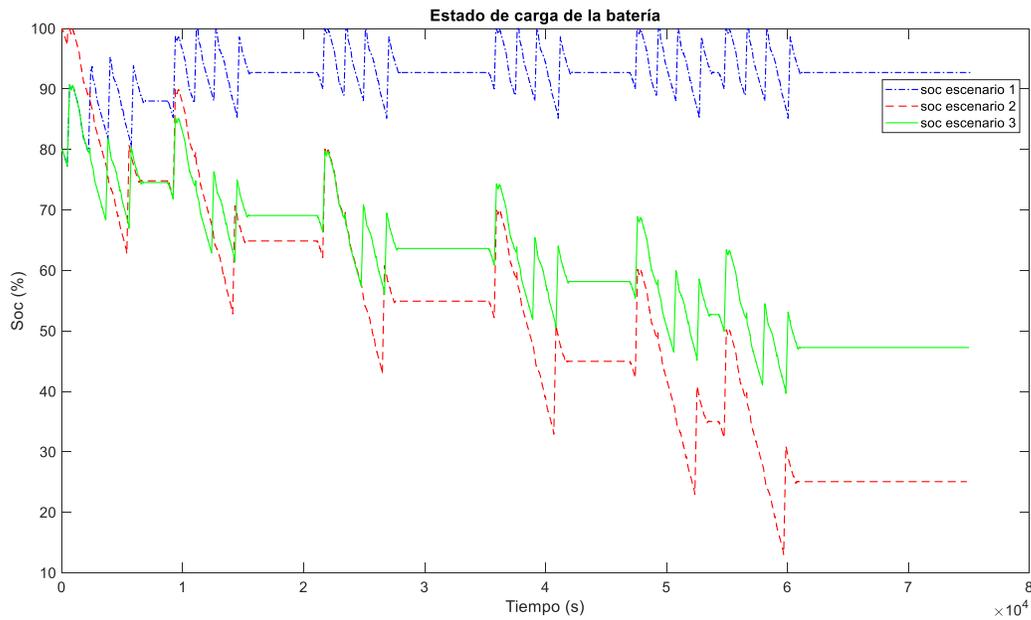


Figura 37. Estado de carga de las baterías para los 3 casos de cargadores.

Finalmente, se realizó un análisis de estado de carga, pero esta vez teniendo en cuenta un factor de envejecimiento, con el fin de determinar cómo sería el comportamiento de esta variable si no se tuviese en cuenta dicho factor para dimensionar la batería. Normalmente este tipo de tecnologías completan su vida útil cuando han perdido el 20 % de su capacidad [65]. En los resultados observados en la Figura 38 se aprecia que el escenario 2 es inviable puesto que la batería llega a 0% del estado de carga, lo que indica que se quedaría sin energía para alimentar el bus. Por otro lado, los estados de carga para el escenario 1 y el escenario 3 son 90.92 % y 39,06 %, respectivamente.

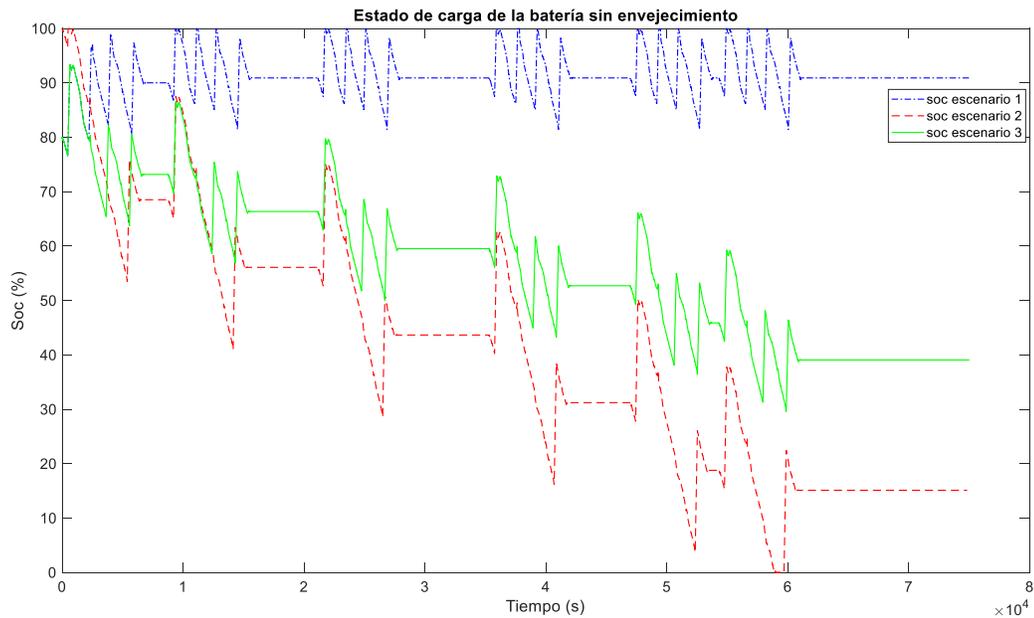


Figura 38. Estado de carga de las baterías para los 3 casos de cargadores considerando envejecimiento.

Según los resultados que se presentan para los 3 casos, y considerando las condiciones descritas previamente, éstos son viables técnicamente. Sin embargo, se debe complementar este análisis con una comparación de costos para concluir cuál de los escenarios es más atractivo para el promotor.

### 3.6. Selección de cargadores en patio

En la sección anterior se pudo observar que en los casos 2 y 3 es necesario instalar cargadores adicionales para que los buses alcancen un estado de carga adecuado durante la noche. Por lo tanto, se debe realizar un dimensionamiento de estos cargadores, que se instalarán en el depósito, permitiendo así que las baterías alcancen el estado de carga inicial planteado para el recorrido en cada caso.

Según el estado de carga visualizado con anterioridad para el caso 1, no son necesarios cargadores en patios puesto que la carga final es mayor que la inicial. En los otros dos casos sí es necesario instalar estos cargadores. La potencia de los cargadores en depósito se asume de 75 kW [4]. Este valor de potencia de cargador se usó para calcular el tiempo necesario que le llevaría la batería llegar al estado inicial asumido, con el fin de cumplir con el tiempo determinado en las horas en las cuales la flota de buses se encuentra fuera de operación, estacionado en los patios.

En la Figura 39 se observa el tiempo que necesitan las baterías en los casos 2 y 3 para ser cargadas. A partir de estos valores se puede determinar que para el escenario 2 son necesarios 6 cargadores y para el escenario 3 sólo se necesitan 3 cargadores. Este número de cargadores

es necesario tenerlo presente a la hora de realizar el análisis sobre la inversión inicial del proyecto. Es importante aclarar que no se muestran resultados para el escenario 1 puesto que el estado de carga final es superior al inicial, por lo cual no se necesitan cargadores en patio.

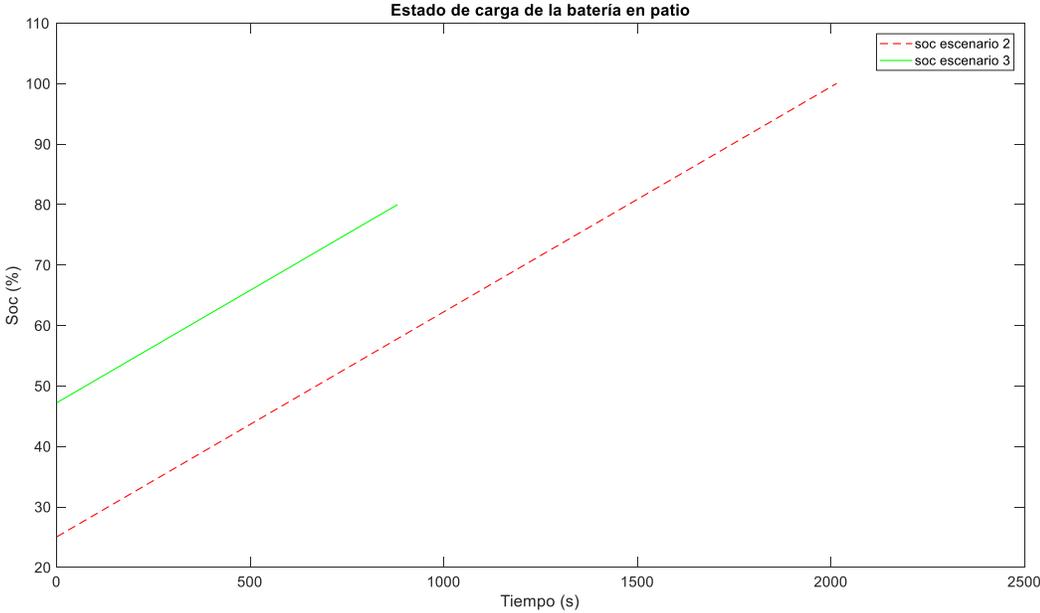


Figura 39. Estado de carga de las baterías en patio al final del recorrido.

#### 4. ANÁLISIS DE COSTOS

El análisis de costos se realiza mediante un presupuesto referencial del proyecto, calculado como un valor anual equivalente, en el cual se tiene en cuenta la inversión en infraestructura eléctrica y en los vehículos requeridos para el funcionamiento de la ruta, y los costos de operación y mantenimiento. Este presupuesto referencial tiene como fin determinar los recursos monetarios necesarios para completar las actividades del proyecto, y servir como elemento de comparación entre tecnologías de buses eléctricos.

Dicho presupuesto se analiza para tres casos, como se describe en la Tabla 9. Estos casos están definidos tanto para el análisis del presente trabajo de grado, como para el trabajo de grado en paralelo de Briñon [23], el cual cuenta con un equipamiento eléctrico diferente.

*Tabla 9. 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

En la Tabla 10 se presentan los costos por unidad que deben ser asumidos por el inversionista que quiera promover el proyecto.

*Tabla 10. Costos de inversión privada- Basados en [4] y [59]*

<b>Bus a Batería</b>		<b>Bus Dual</b>	
<b>Elemento</b>	<b>Precio [COP]</b>	<b>Elemento</b>	<b>Precio [COP]</b>
Bus 12 m	\$1.221.654.000	Bus 12 m	\$1.185.723.000
Batería LTO	\$3.413.445	Batería LFP (1kWh)	\$1.545.033
Cargadores en ruta 150kW	\$538.965.000	Cargador 75 kW en patio	\$125.758.500
Cargadores en patio	\$125.758.500	Subestación tracción 300 kW	\$1.084.125.000
Cargadores en ruta 200kW	\$718.620.000	Catenaria (/km)	\$1.245.814.500
Costo taller, portal y patio	\$180.274.500	Costo taller, portal y patio	\$180.274.500

Los costos operativos son los que se prevé serán necesarios para la puesta en operación de la flota. En éstos se incluyen los costos administrativos y del personal a cargo del manejo de la flota, que abarca los conductores y el personal administrativo necesario para dirigir los buses. 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. Los datos necesarios para realizar el análisis de costos de operación se presentan en la Tabla 11.

*Tabla 11. Datos Operativos [59]*

<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
<b>Salario base personal administrativo sin prestaciones [COP]</b>	\$2.600.000
<b>Salario base conductor con prestaciones [COP]</b>	\$1.950.000

<b>Salario base personal administrativo con prestaciones [COP]</b>	\$3.900.000
<b>Salario estimado total conductores con prestaciones [COP]</b>	\$307.125.000
<b>Salario estimado total personal administrativo con prestaciones [COP]</b>	\$12.285.000
<b>SOAT [COP]/bus*</b>	\$889.300

\*Valor actual vigente, consultado en SURA

Con los datos establecidos en la tabla anterior, se calculan los costos operativos y administrativos estimados que se deben tener en cuenta para el análisis. En la Tabla 12 y en la Tabla 13 se presentan dichos valores.

*Tabla 12. Costos Operativos*

<b>Salario base conductor con prestaciones al año[COP]</b>	\$3.685.500.000
<b>Salario base personal administrativo con prestaciones al año [COP]</b>	\$147.420.000

*Tabla 13. Costos administrativos*

<b>SOAT [COP]</b>	\$56.025.900
-------------------	--------------

En la Tabla 14 se presenta el costo total de la energía eléctrica consumida por la flota durante un año. El precio de la energía utilizado para este cálculo corresponde al de un usuario regulado nivel II en la red de Empresas Públicas de Medellín para el mes de septiembre de 2018 [66].

*Tabla 14. Costos Energéticos [66]*

<b>Energía total de la flota por día [kWh]</b>	9.707,00
<b>Días de operación</b>	365
<b>Precio de energía COP/kWh</b>	492,26
<b>Valor total anual</b>	\$1.720.212.415,2

Para realizar una mejor comparación entre alternativas, se toman los casos de la *Tabla 9* y se examinan los valores como se muestra de la *Tabla 15* a la *Tabla 20*. Los valores se presentan en USD y COP, considerando una TRM de 3097,5 COP/USD, correspondiente al día 14 de octubre de 2018 [67]. En estas tablas comparativas se considera el tipo de bus, el tipo de tecnología para la batería, la infraestructura eléctrica en ruta, y la infraestructura eléctrica de parqueadero o patio.

*Tabla 15. Costos para el caso 1- bus a batería [4].*

<b>Elemento</b>	<b>Cantida d</b>	<b>Costo unidad [USD]</b>	<b>Costo Total [USD]</b>	<b>Costo Total [COP]</b>
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>	\$33.722.490	\$104.455.412.775
------------------------------------	--------------	-------------------

Tabla 16. Costos para el caso 1- bus dual [4] y [68].

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 17. Costos para el caso 2- bus a batería [4].

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>			\$33.734.090	\$104.491.343.775

Tabla 18. Costos para el caso 2- bus dual [4] y [68].

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 19. Costos para el caso 3- bus a batería [4].

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

Elemento	Cantidad	Costo unidad [USD]	Costo Total [USD]	Costo Total [COP]
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 20. Costos para el caso 3- bus dual [4] y [68].

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 40 se presenta el comparativo de costos de inversión para los tres casos. En cada una de las tecnologías se observa que para los buses duales el impacto de la longitud de las catenarias es significativo, pues es el que da la distinción entre cada uno de los casos. Por otro lado, para el caso de bus de batería, los precios no se diferencian de manera significativa, puesto que la distinción entre los casos es el número de cargadores y el precio de estos no afecta de manera considerable las diferentes alternativas, siendo el costo de los buses el que representa el mayor peso en el resultado final.

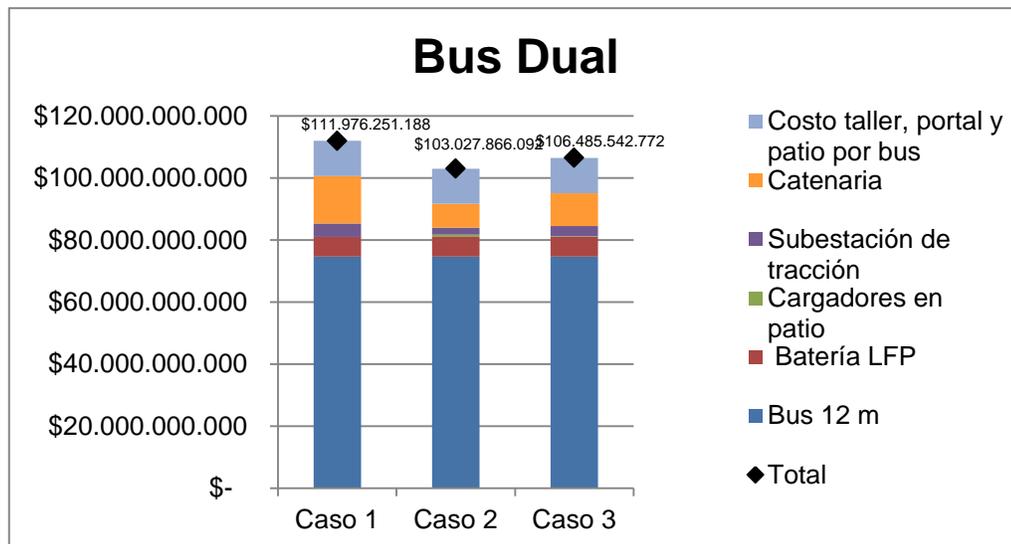
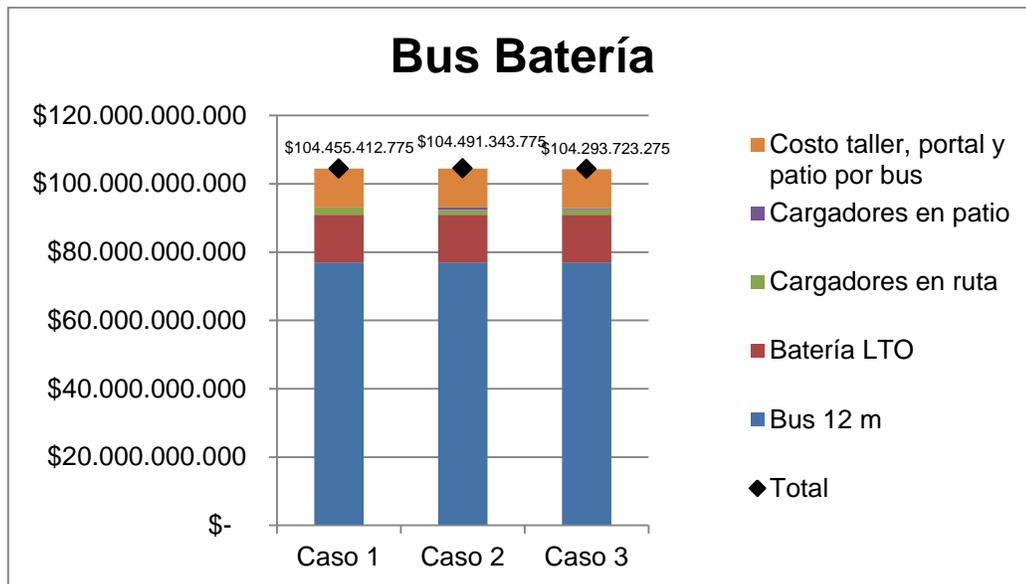


Figura 40. Comparativo de costos de inversión en los tres casos de análisis

En la Figura 41 se grafican los costos totales de inversión en cargadores para los tres casos de estudio. Se puede apreciar que la inversión en cargadores en ruta representa el mayor peso en este componente.

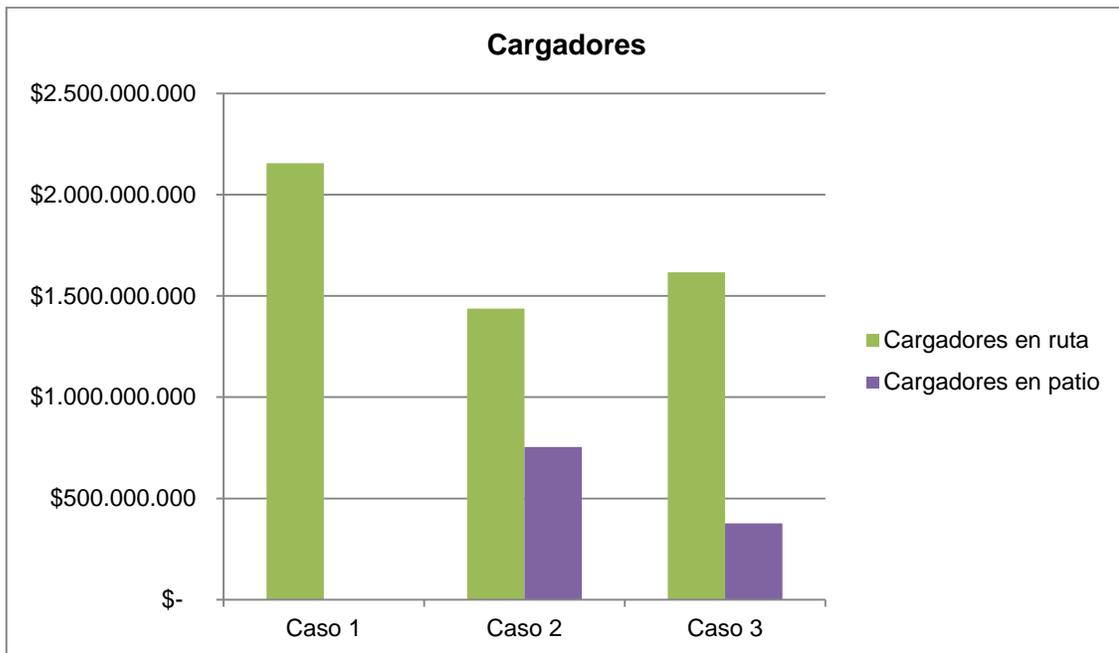


Figura 41. Precio de cargadores para buses a batería

Se puede concluir a partir de las figuras y tablas anteriores que, comparando ambas tecnologías (bus a baterías y buses duales), no hay un margen muy grande entre los costos de inversión.

Posterior al análisis de inversión, se procedió a calcular el valor anual equivalente (VAE) asumiendo un período de 10 años. Este valor representa el valor anual fijo que el inversionista debe considerar para cubrir todos los costos de inversión, operación y mantenimiento, y permite 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 reemplazadas, pues su capacidad puede haberse reducido al 80%. También se tuvo en cuenta el IPP (Índice de precios al productor) para la actualización anual de los costos de operación y mantenimiento, 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, se halla el valor actual neto (VAN), actualizando todos los flujos de caja al año 0, considerando una tasa de descuento  $i$  de 15%, tal como se describe en la Ecuación 11.

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

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.

Posteriormente se procede con el cálculo del valor actual equivalente (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:

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

En la Tabla 21 y en la Figura 42 se observa el valor anual que se debe pagar según cada escenario propuesto. Para buses de batería dicho valor es muy similar entre todos los casos, siendo el caso 2 el mayor valor debido a la cantidad de cargadores en patio que se deberían adquirir con esta opción. Por otro lado, para el caso 1 de buses duales, se presenta el mayor valor debido a los kilómetros de catenaria que deben ser instalados en esta alternativa. Los casos 2 y 3 para buses duales con carga dinámica presentan por su parte valores muy cercanos.

Tabla 21. Valor Anual Equivalente

Bus Dual			Bus Batería		
Caso 1	Caso 2	Caso3	Caso 1	Caso 2	Caso3
\$35.112.239.405	\$32.818.253.022	\$33.704.654.662	\$33.184.215.441	\$33.193.426.625	\$33.142.765.111

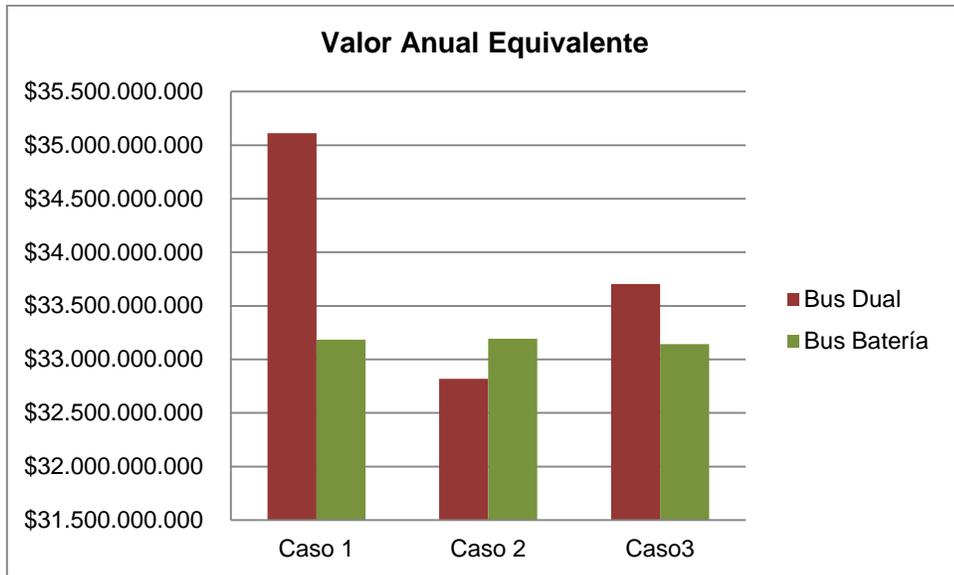


Figura 42. Valor anual equivalente comparado entre buses duales y buses a batería.

## CONCLUSIONES

Durante las últimas décadas se han venido estudiando los sistemas de tracción eléctrica como una posible solución para el transporte público. Estos estudios presentan un alto grado de complejidad puesto que existen muchas opciones tecnológicas que se pueden acoplar a las necesidades específicas de las rutas, a los planes urbanos y de movilidad de la ciudad, y a los intereses de los inversionistas. En este trabajo de grado se analizó una alternativa que propone buses eléctricos alimentados con baterías de litio titanato como fuente principal, y una infraestructura de recarga de oportunidad para dichas baterías, en la ruta Circular Sur 302 de la ciudad de Medellín. Sin embargo, no se descarta que existan alternativas tecnológicas paralelas que puedan implementarse en dicha ruta.

Para la elaboración de este trabajo, se realizó una vigilancia tecnológica que permitió profundizar en el conocimiento sobre buses eléctricos a batería, las tecnologías de almacenamiento, y los cargadores de oportunidad. Este ejercicio también permitió observar que estas soluciones para el transporte público ya se han venido implementando en varias ciudades, y que con el paso del tiempo han mejorado su desarrollo, haciendo que se vuelvan una opción atractiva para la transformación del entorno urbano.

El análisis técnico realizado en este trabajo consideró el consumo energético de la flota del Circular Sur 302, obtenido mediante simulación numérica en el software Open Track, cuyo modelo tiene en cuenta la frecuencia de despacho y las características de la ruta y de los buses. El análisis estadístico de los datos se realizó empleando una herramienta propia desarrollada en Matlab, con la cual se obtuvo unos resultados que indican que la implementación de los sistemas, tanto de buses con sólo batería como los duales, son factibles para su implementación.

Se estudiaron tres casos en los cuales se planteaba una recarga en ruta con cargadores de diferente potencia que se adecuara al escenario, y de manera paralela se comparó con el trabajo de grado de la estudiante Maria Elisa Briñón [23], la cual planteó tres casos de estudio pero con instalación de catenarias en diferentes zonas de la ruta, que permitían la recarga dinámica de buses duales con baterías de litio ferfosfato. La potencia de las baterías considerada en ambos estudios fue la misma para así poder realizar comparaciones en términos de precios y comportamiento durante la operación.

Desde el análisis de costos se observó que para los buses de batería el comportamiento en los tres escenarios propuestos es muy similar. Esto se debe a que el impacto de los cargadores no es muy relevante y son las baterías las que introducen un mayor costo, puesto que la tecnología de litio titanato presenta precios de mercado mayores que las baterías de litio ferfosfato. Por otro lado, en comparación con la tecnología de buses duales con baterías de respaldo de litio ferfosfato, se puede concluir que los costos totales no presentan una diferencia considerable, dejando así que los factores para argumentar cuál tecnología debe ser implementada sean más técnicos y de operación o de criterio del inversionista.

Una ventaja sobre la tecnología de buses duales, es que para buses eléctricos a batería no se deben construir líneas aéreas de contacto, siendo éste el factor económico que más afectaría al inversionista. Sin embargo, las paradas para realizar la recarga afectarían el despacho de la flota, por lo cual se debe hacer un análisis más a fondo sobre el beneficio/costo teniendo en cuenta el tiempo de operación de los buses.

Este trabajo es una contribución a la consolidación del Grupo T&D de la Universidad Pontificia Bolivariana en su línea de investigación en transporte eléctrico. Además, la investigación realizada será un punto de partida para que el grupo pueda formular modelos de planeación de sistemas más complejos de transporte con buses eléctricos, que incluyan distintos escenarios y variables de decisión.

## TRABAJOS A FUTURO

El modelo y procesamiento de datos considera los parámetros más relevantes para el análisis técnico de la ruta propuesta y la implementación de la tecnología de buses a batería, comparándola con buses duales con batería de respaldo; sin embargo, hay un ítem con el que se puede realizar una investigación más profunda y es la posibilidad de tener en cuenta el consumo de equipos auxiliares, que son calefacción y aire acondicionado, puesto que son los elementos adicionales de los autobuses que más consumen energía.

El proyecto permitió construir una estructura de costos inicial para comparar dos tecnologías de buses eléctricos en condiciones operativas similares. Sin embargo, en un trabajo posterior, se podría realizar un análisis financiero completo teniendo en cuenta el retorno que se puede obtener, según la inversión y los beneficios de la puesta en operación de este tipo de tecnología.

Por otro lado 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 de optimización que consideren todos estos factores.

## REFERENCIAS

- [1] J. San Miguel, “Diseño de un cargador de baterías de 12 voltios haciendo uso de un panel fotovoltaico aplicado en zonas rurales”, Pontificia Universidad Católica del Perú, 2009.
- [2] A. E. Díez Restrepo *et al.*, “Informe final fase I: Análisis de alternativas de transporte eléctrico masivo de mediana capacidad para la ciudad de Bogotá”, Bogotá, 2010.
- [3] C. Peña, “Estudio de Baterías para vehículos eléctricos”, Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior, 2011.
- [4] D. Göhlich, T.-A. Fay, D. Jefferies, E. Lauth, A. Kunith, y X. Zhang, “Design of urban electric bus systems”, 2018.
- [5] 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. 2003. FUZZ '03.*, vol. 2, pp. 1068–1073, 2003.
- [6] P. Alzate, “Metodología para la inserción de un sistema BRT de mediana capacidad en Colombia”, Universidad Pontificia Bolivariana, 2017.
- [7] Energy EV, “¿Qué es y cómo funciona el frenado regenerativo?”, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://energyev.com/que-es-y-como-funciona-el-frenado-regenerativo/>.
- [8] Fundación para la Salud Geoambiental, “Material particulado”, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.saludgeoambiental.org/material-particulado>.
- [9] 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.
- [10] International Energy Agency, *Air Pollution*, 1a ed. París: IEA, 2016.
- [11] Secretaria de Movilidad de Medellín, “Vehículos matriculados en la Secretaría de Movilidad de Medellín- Abril de 2018”, Medellín, 2018.
- [12] J. Bedoya y E. Martinez, “Calidad del aire en el Valle de Aburrá Antioquia -Colombia”, *Univ. Nac. Colomb.*, vol. 158, núm. 0012-7353, p. 9, 2008.
- [13] G. Gibson, R. Milnes, M. Morris, y N. Hill, “Public transport”, *IEA-ETSAP*, 2011. [En línea]. Disponible en: [https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/T10\\_Public\\_Transport\\_v3\\_final\\_gs06062011.pdf](https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/T10_Public_Transport_v3_final_gs06062011.pdf). [Consultado: 14-jun-2018].
- [14] M. T. Sebastiani, R. Luders, y K. V. O. Fonseca, “Evaluating Electric Bus Operation for a Real-World BRT Public Transportation Using Simulation Optimization”, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 17, núm. 10, pp. 2777–2786, 2016.
- [15] G. De Filippo, V. Marano, y R. Sioshansi, “Simulation of an electric transportation system at The Ohio State University”, *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1686–1691, 2014.
- [16] J. Q. Li, “Battery-electric transit bus developments and operations: A review”, *Int. J. Sustain. Transp.*, vol. 10, núm. 3, pp. 157–169, 2016.
- [17] D. Perrotta *et al.*, “Route Planning for Electric Buses: A Case Study in Oporto”, *Procedia* -

- Soc. Behav. Sci.*, vol. 111, pp. 1004–1014, 2014.
- [18] P. Sinhuber, W. Rohlf, y D. U. Sauer, “Study on power and energy demand for sizing the energy storage systems for electrified local public transport buses”, *2012 IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, pp. 315–320, 2012.
- [19] 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.
- [20] Z. Gao *et al.*, “Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service”, *Energy*, vol. 122, pp. 588–600, 2017.
- [21] S. Liu, J. Jiang, W. Shi, H. Guo, N. Active, y D. Network, “State of Charge and Peak Power Estimation of NCM / Li 4 Ti 5 O 12 Battery Using IC Curve for Rail Tractor Application”, pp. 1–3, 2014.
- [22] M. Mohamed, H. Farag, N. El-Taweel, y M. Ferguson, “Simulation of electric buses on a full transit network: Operational feasibility and grid impact analysis”, *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 142, núm. October, pp. 163–175, 2017.
- [23] M. E. Briñon, “Metodología para la implementación de buses eléctricos duales con baterías litio-Ferrofosfato en la ruta circular sur 302 de Medellín, Colombia”, Universidad Pontificia Bolivariana, 2017.
- [24] B. J. Simpson, *Urban Public Transport Today*. London: E&FN Spon, 2003.
- [25] A. E. Díez, A. Bohorquez, M. Figueroa, J. A. Velásquez, y I. C. Díez, “Análisis de la factibilidad de implementación de una solución de transporte masivo eléctrico de mediana capacidad en la ciudad de Bogotá”, Bogotá, 2010.
- [26] METROCALI S.A, “Guía de diseño del espacio público de las paradas pre troncales y alimentadoras del SITM-MIO”, Cali, 2013.
- [27] Shutterstock Macrovector, “Fotos de stock de Trolley bus”. [En línea]. Disponible en: [https://www.shutterstock.com/search?searchterm=trolley+bus&search\\_source=base\\_search\\_form&language=es&page=1&sort=popular&image\\_type=all&measurement=px&safe=true](https://www.shutterstock.com/search?searchterm=trolley+bus&search_source=base_search_form&language=es&page=1&sort=popular&image_type=all&measurement=px&safe=true). [Consultado: 10-jun-2018].
- [28] A. E. Díez, P. Alzate, y J. V. Restrepo, “Marco Teórico Respaldo a Pliegos De Buses Modelación De Costos Entregable Final”, Medellín, 2014.
- [29] Liyuan Battery CO, “Liyuan Battery CO”, 2010. [En línea]. Disponible en: [http://www.liyuanbattery.com.cn/en/product\\_detail-788672-965123-81296.html](http://www.liyuanbattery.com.cn/en/product_detail-788672-965123-81296.html).
- [30] Proterra, “Prodrive Drivetrain”, *Proterradrivertrains*, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.proterra.com/technology/drivetrain/>.
- [31] B. B. Borghei y T. Magnusson, “Niche aggregation through cumulative learning: A Multiple case study of electric bus projects”, *Environ. Innov. Soc. Transitions*, vol. 28, núm. April, pp. 108–121, 2018.
- [32] ebus- Smart way, “Trolleybus in Parma”, *Promoting electric public transport- Trolley*. [En línea]. Disponible en: <http://www.trolley-project.eu/index.php?id=72>. [Consultado: 02-may-2018].
- [33] Wikipedia, “Trolleybuses in Parma”, 2018. [En línea]. Disponible en:

- [https://en.wikipedia.org/wiki/Trolleybuses\\_in\\_Parma](https://en.wikipedia.org/wiki/Trolleybuses_in_Parma). [Consultado: 15-sep-2018].
- [34] J. Olaizola, “LOS TROLEBUSES DE CASTELLÓN”, *Historias del tren*, 2013. [En línea]. Disponible en: <http://historiastren.blogspot.com.co/2013/02/los-trolebuses-de-castellon.html>. [Consultado: 06-may-2018].
- [35] Castellón en red, “Archivo:Tramcastellón”, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Tramcastellón.jpg>. [Consultado: 15-sep-2018].
- [36] M. R. Duran, “Quito Trole”, 2011. [En línea]. Disponible en: [https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Quito\\_Trole\\_06\\_2011\\_1933.jpg](https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Quito_Trole_06_2011_1933.jpg). [Consultado: 15-sep-2018].
- [37] Andes.net, “Sistema Trolebús de Mérida”, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.andes.net/trolebus/trolebus.html>.
- [38] Electromaps, “Noticias sobre autobuses eléctricos”, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.electromaps.com/noticias/autobuses-electricos>. [Consultado: 04-may-2018].
- [39] BCN Bus Spotter, “TMB 1110-Barcelona”, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.flickr.com/photos/149692162@N04/23824172118/>. [Consultado: 15-oct-2018].
- [40] L. Lu, L. Xue, y W. Zhou, “How Did Shenzhen, China Build World’s Largest Electric Bus Fleet?”, *World Resources Institute*, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.wri.org/blog/2018/04/how-did-shenzhen-china-build-world-s-largest-electric-bus-fleet>. [Consultado: 10-may-2018].
- [41] Bennyzhong, “Shenzhen ebus”, 2013. [En línea]. Disponible en: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Shenzhen\\_ibus\\_m414.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Shenzhen_ibus_m414.JPG). [Consultado: 18-sep-2018].
- [42] J. Valero, “Berlín dice sí al autobús eléctrico y comenzará en junio su implementación”, *Hipertextual*, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://hipertextual.com/2015/03/berlin-autobus-electrico>. [Consultado: 15-may-2018].
- [43] IBLU, “Sol150”, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sol150.jpg>. [Consultado: 28-sep-2018].
- [44] Cadex, “Types of Lithium-ion”, *Battery University*, 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: 16-jun-2018].
- [45] J. Mei, E. K. W. Cheng, y Y. C. Fong, “Lithium-titanate battery (LTO): A better choice for high current equipment”, *2016 Int. Symp. Electr. Eng. ISEE 2016*, pp. 4–7, 2017.
- [46] L. W. Yao, J. A. Aziz, P. Y. Kong, N. R. N. Idris, y I. M. Alsofyani, “Modeling of lithium titanate battery for charger design”, *2014 Australas. Univ. Power Eng. Conf. AUPEC 2014 - Proc.*, núm. October, pp. 1–5, 2014.
- [47] J. B. Rosas, “Viabilidad de Vehículos Eléctricos Mexicanos para la CD. De México”, México, 2016.
- [48] BELKOMMUNMASH, “TROLLEYBUS MODEL 32100D”. [En línea]. Disponible en: <https://bkm.by/en/catalog/trolleibus-modeli-32100d/>. [Consultado: 05-abr-2018].
- [49] ABB TOSA, “TOSA – Enabling a new generation of electric buses Flash-charging

- technology for sustainable e-mobility”, *ABB*, 2018. [En línea]. Disponible en: [https://library.e.abb.com/public/ba41f281771a41e3a1da537b42842729/ABB\\_factsheetA4\\_TOSA\\_technology\\_EN.pdf](https://library.e.abb.com/public/ba41f281771a41e3a1da537b42842729/ABB_factsheetA4_TOSA_technology_EN.pdf). [Consultado: 03-may-2018].
- [50] Furrer+Frey, “Automatic High Power Charging for Buses, Trucks, and Trains”, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.opbrid.com/v3-and-650kw-charger>. [Consultado: 18-oct-2018].
- [51] Правительство Москвы, “Linkker”, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Linkker.jpg>. [Consultado: 15-oct-2018].
- [52] Galeria difusión y prensa, “Volvo Electric City”. [En línea]. Disponible en: <https://www.flickr.com/photos/86223174@N03/19597856391/in/photostream/>.
- [53] Oppcharge, “OppCharge User Guide”, *OPPCharge*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.oppcharge.org/>. [Consultado: 20-jun-2018].
- [54] Volvo Bus Corporation, “OPPCharge FAST CHARGING OF ELECTRIC VEHICLES”. [En línea]. Disponible en: <https://www.oppcharge.org/>.
- [55] OpenTrack Railway Technology Ltd., “OPEN TRACK”. Zürich, 2013.
- [56] MATLAB, “Data Analytics MathWorks”, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/solutions/data-analytics.html>. [Consultado: 16-ago-2018].
- [57] F. Domenech, “Trenes movidos por motores de continua: mejoramiento del desempeño vinculados al empleo de equipos de electrónica de potencia”, Universidad de Chile, 2007.
- [58] T. Kulworawanichpong y S. Punpaisarn, “Dynamic Simulation of Electric Bus Vehicle”, vol. 2, núm. 3, pp. 99–104, 2014.
- [59] 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, Medellín, 2010.
- [60] “Ruta 302 Circular Sur”, *google maps*, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.google.com/maps/d/u/0/embed?mid=1CMw5ceHFneLtd1DMU3X7X9irc8o&ll=6.23093493140433%2C-75.55324405431747&z=13>. [Consultado: 19-mar-2018].
- [61] Vossloh Kiepe, “Kiepe Traction Equipment for the Low-floor Trolleybuses and Articulated Low-floor Trolleybuses for Athens, Greece”, Athenes, 2015.
- [62] WEG COLOMBIA LTDA, “La eficiencia de los motores”, *WEG*, 2002. [En línea]. Disponible en: <http://old.weg.net/co>. [Consultado: 20-sep-2018].
- [63] Renault, “Fluence and Fluenze Z.E. Life Cycle Assessment”, 2011.
- [64] Solar Energy, “Inversor industronic 1”, Colorado, 2018.
- [65] R. Kanapady, K. Y. Kyle, y J. Lee, “Battery life estimation model and analysis for electronic buses with auxiliary energy storage systems”, *Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC*, pp. 945–950, 2017.
- [66] Empresas Públicas de Medellín, “Tarifas y costo de Energía Eléctrica- Mercado Regulado”, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.epm.com.co/site/Portals/2/Documentos/tarifas/Energia2018/PublicacionSeptiembre152018.pdf?ver=2018-09-18-081644-860>. [Consultado: 01-sep-2018].

- [67] Investing, “USD/COP - Dólar estadounidense Peso colombiano”, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://es.investing.com/currencies/usd-cop-historical-data>. [Consultado: 14-oct-2018].
- [68] O. Wyszomirski, *The Trolleybus as an Urban Means of Transport in the Light of the Trolley Project*. Gdańsk: Central Europe, 2013.