

Lecciones aprendidas en la implementación de modelos de negocio para la masificación de buses eléctricos en Latinoamérica y el Caribe

Autores:

Oscar Mauricio Beltrán Real
Benoit Jean-Marie Lefevre
Carlos Hernán Mojica

División de Transporte
División de Cambio Climático

NOTA TÉCNICA N°
IBN-TN-02307

Octubre 2021

Lecciones aprendidas en la implementación de modelos de negocio para la masificación de buses eléctricos en Latinoamérica y el Caribe

Autores:

Oscar Mauricio Beltrán Real

Benoit Jean-Marie Lefevre

Carlos Hernán Mojica

**Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo**

Beltrán, Oscar.

Lecciones aprendidas en la implementación de modelos de negocio para la masificación de buses eléctricos en Latinoamérica y el Caribe / Oscar Mauricio Beltrán Real, Benoit Jean Marie Lefevre, Carlos Mojica.

p. cm. — (Nota técnica del BID ; 2307)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Buses, Electric-Economic aspects-Latin America. 2. Buses, Electric-Economic aspects-Caribbean Area. 3. Electric vehicles-Economic aspects-Latin America. 4. Electric vehicles-Economic aspects-Caribbean Area. I. Lefevre, Benoit Jean Marie. II. Mojica, Carlos. III. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático. IV. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Transporte. V. Título. VI. Serie. IDB-TN-2307

Códigos JEL: A1, D40, D47, R4, R42, R48

Palabras clave: Electromovilidad, Buses eléctricos, Modelo de negocio, Transporte público, Movilidad sostenible.

<http://www.iadb.org>

Copyright © [2021] Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la CNUDMI (UNCITRAL). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



Información de contacto:

benoitl@iadb.org

cmojica@iadb.org

Lecciones Aprendidas en la Implementación de Modelos de Negocio para la Masificación de Buses Eléctricos en Latinoamérica y el Caribe



Lecciones Aprendidas en la Implementación de Modelos de Negocio para la Masificación de Buses Eléctricos en Latinoamérica y el Caribe

Este estudio fue comisionado por el Banco Interamericano de Desarrollo (IDB, por sus siglas en inglés) bajo la cooperación técnica regional RG-T3078 que sostiene varios países y ciudades de la región América Latina y el Caribe.

El objetivo de este apoyo es evaluar alternativas y establecer los modelos de negocio y mecanismos de financiación más factibles y viables para la masificación de buses eléctricos en las ciudades de América Latina y el Caribe.

Este informe recopila los resultados, lecciones aprendidas y recomendaciones de los modelos de negocio que se han desarrollado bajo la cooperación técnica regional RG-T3078 en varios países de la región para la implementación de buses eléctricos; de tal manera que sirva como guía metodológica para autoridades de transporte, empresas del sector privado y gobiernos que estén interesados en la adquisición y puesta en operación de esta tecnología.

Autores

Oscar Mauricio Beltrán Real

Benoit Jean-Marie Lefevre

Carlos Hernán Mojica,



Agradecimientos

Este informe es parte del trabajo del Banco Interamericano de Desarrollo sobre Movilidad Eléctrica que busca ayudar a los países clientes a avanzar en la política de habilitación, esquemas regulatorios, operativos y modelos de negocio para el despliegue de la movilidad eléctrica en la región.

Específicamente, este informe recopila los resultados, lecciones aprendidas y recomendaciones de los modelos de negocios que se han desarrollado bajo la cooperación técnica regional RG-T3078 en varios países de América Latina para la implementación de buses eléctricos; de tal manera que sirva de guía metodológica para las autoridades de transporte, empresas del sector privado y gobiernos interesados en adquirir y poner en funcionamiento esta tecnología.

Agradecemos especialmente al Fondo Multidonante Acelerador (ACL), al Fondo de

Sostenibilidad y al Fondo de Infraestructura por el apoyo financiero a esta actividad.

El informe se preparó bajo la dirección general de Graham Watkins, Ariel Yepez y Nestor Roa, jefes de las divisiones de cambio climático, energía y transporte. Los líderes del equipo de tareas son Benoit Lefevre y Carlos Mojica. El autor principal del informe es Oscar Beltrán.

El equipo agradece especialmente a Fanny Bertossi, Karisa Maia Ribeiro, Cecilia Correa Poseiro, Roberto Gabriel Aiello, Richard Alexander Mix Vidal, Adrien Vogt-Schilb, del Banco Interamericano de Desarrollo, y Daniel Magallon y Francisco Ramirez Cartagena de BASE, Sebastián Galarza Suárez del Centro Mario Molina Chile, Jorge Chávez Davilan y León García Medrano de Steer México, por sus comentarios y revisión.

Contenido

INTRODUCCIÓN

RESUMEN EJECUTIVO

1. CONTEXTO - BUSES ELÉCTRICOS EN TRANSPORTE PÚBLICO

1.1 Buses Eléctricos en el Mundo y en LAC

Actores que intervienen en los proyectos de Buses Eléctricos

2. CONDICIONES OPERACIONALES DE LOS BUSES ELÉCTRICOS

2.1. Esquemas de Operación y Carga

2.1.1. Estrategias de Carga

2.1.2. Dimensionamiento de Flota y Asignación Horaria

2.2. Rutas

2.2.1. Evaluación de rutas con mayor potencial de ser electrificadas

2.2.2. Impacto de las rutas largas

2.2.3. Otros apoyos asociados a la operación

3. ACTIVOS: BUSES E INFRAESTRUCTURA DE CARGA

3.1. Buses.

3.1.1. Mercado de buses y tipologías en LAC 30

3.1.2. Variables a tener en cuenta en la escogencia del tipo de vehículo 31

3.2. Baterías.

3.3. Cargadores.

3.4. Patios y Talleres.

3.5. Almacén de Baterías.

3.6. Redes eléctricas

4. CONDICIONES HABILITANTES

4.1. Marcos estratégicos

4.2. Marcos legales: leyes, normas y regulación

4.3. Marcos fiscales y recursos para los sistemas

5. MODELOS DE NEGOCIO

5.1. Fuentes de recursos e ingresos

5.2. Esquemas de financiamiento

5.2.1. Esquemas financieros analizados y desarrollados en LAC

5.3. Contratos

5.3.1. Particularidades de la contratación en LAC

6. SOSTENIBILIDAD ECONÓMICA

6.1. Costo Total de la Propiedad (TCO)

6.1.1. CAPEX



Introducción

A medida que la población de las ciudades del mundo continúa creciendo, las opciones de movilidad sostenible se convierten en una necesidad para reducir las emisiones nocivas y mejorar la calidad del aire.

En Latinoamérica y el Caribe (LAC), el sector transporte es el responsable del 35% de las emisiones de CO₂, convirtiéndose en el más importante por su consumo energético; mientras a nivel mundial es responsable del 24%. Es así como, 5 de las principales ciudades de la región, Ciudad de México, Bogotá, Sao Paulo, Lima y Santiago, se encuentran entre las 100 ciudades con peor calidad del aire a nivel mundial¹, con mediciones que en algunos casos sobrepasan los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud y llegan a niveles que son insalubres para grupos poblacionales sensibles; sumado al hecho que la congestión y los siniestros viales imponen un alto costo en las ciudades de la región, cercano al 1% del PIB nacional².

Es por esto que gobiernos y autoridades de transporte de ciudades Latinoamericanas realizan esfuerzos cada vez mayores por adquirir e implementar tecnologías de buses eléctricos que contribuyan en la reducción del impacto en el medio ambiente y mejoren la calidad de vida de los ciudadanos. Adicional al hecho que la electrificación en el transporte público se reconoce como una de las transformaciones sectoriales necesarias para cumplir con los

objetivos del acuerdo de París y que a su vez, mejora impulsa el mejoramiento en los resultados de desarrollo en la región³.

En la región, ciudades como Bogotá, Cali, Medellín, Lima, Santiago, Buenos Aires, Ciudad de Guatemala, entre otras; han desarrollado sus modelos de negocio con apoyo del BID y a partir de la experiencia de consultores especializados, quienes con la información disponible han modelado diferentes escenarios para la electrificación de la flota. Cada uno de estos ejercicios atiende a las particularidades de cada país y establece los mecanismos de articulación y flujo de procesos y recursos entre los diferentes actores que intervienen en cada proyecto.

Este documento presenta la situación actual de la región en cuanto al desarrollo de políticas y estrategias para la implementación de buses eléctricos, los beneficios del cambio de tecnología, los avances que se tienen en la región y las barreras que aún persisten y que deben ser superadas. Adicionalmente, se convierte en una guía práctica para orientar a aquellos gobiernos interesados en promover la movilidad eléctrica en el transporte público, partiendo de la premisa que el éxito de este tipo de proyectos parte de una correcta estructuración técnica, legal y financiera; que deberá ser respaldada con un compromiso político que permita garantizar su continuidad en el tiempo.

¹IQAir. Air quality and pollution city ranking. 2019.

²Calatayud, Agustina, Santiago Sánchez González, Felipe Bedoya Maya, Francisca Giraldez Zúñiga, and José María Márquez. 2021. Congestión Urbana En América Latina y El Caribe: Características, Costos y Mitigación. Inter-American Development Bank. <https://doi.org/10.18235/0003149>.

³IDB, and DDPLAC. 2019. "Getting to Net-Zero Emissions: Lessons from Latin America and the Caribbean." Inter-American Development Bank and Deep Decarbonization Pathways for Latin America and the Caribbean. <https://doi.org/10.18235/0002024>.

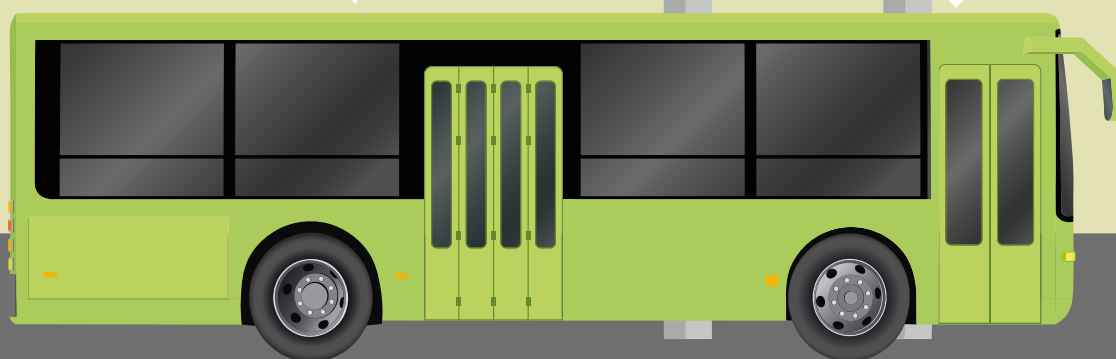
Seguido de esta introducción, en el capítulo 2 se desarrolla el resumen ejecutivo en el capítulo 2 con los datos, idease interrogantes más relevantes acerca del estado actual de la implementación de buses eléctricos en la región y los aspectos claves para el éxito en su desarrollo. El capítulo 3, contiene una descripción de los beneficios de la implementación de buses eléctricos en sistemas de transporte público, así como el estado actual de esta tecnología en LAC y en el mundo. Posteriormente en el capítulo 4 se presenta en detalle las diferentes estrategias de operación y de recarga eléctrica resaltando las ventajas y desventajas de cada propuesta. Además se analizan algunos ejemplos de parámetros operacionales como, asignación horaria, dimensionamiento de flota, evaluación de rutas, y el impacto que puede tener la distancia recorrida en la operación de este tipo de buses. El capítulo 5 presenta la descripción de los activos más relevantes requeridos para la implementación de buses eléctricos. Posteriormente en el capítulo 6 se incluye una descripción de los marcos estratégicos, normativos y legales que se deben tener en cuenta para una adecuada estructuración e implementación de este

tipo de proyectos; incluyendo los fondos de contingencia y el sistema de recaudo electrónico. En el capítulo 7 se hace un recuento de los modelos de negocio adoptados en la región y los planes, programas o iniciativas que enmarcan la implementación de buses eléctricos en cada uno de los países. Se presentan también los esquemas de financiación y de contratación, además de una descripción de las características de los buses eléctricos, sus diferencias con otras tecnologías y la infraestructura necesaria para su operación. En el capítulo 8 se realiza un análisis de sostenibilidad económica y financiera del sistema, que incluye un recuento de los costos de capital y de operación de la tecnología”, así como la estimación del costo total de la propiedad, así como la estimación de indicadores de rentabilidad para los escenarios propuestos en cada uno de los proyectos evaluados. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones más importantes del desarrollo del documento.

Este documento incluye un anexo con los modelos de negocio desarrollados en LAC para la implementación de buses eléctricos.



eléctricos.



Resumen Ejecutivo

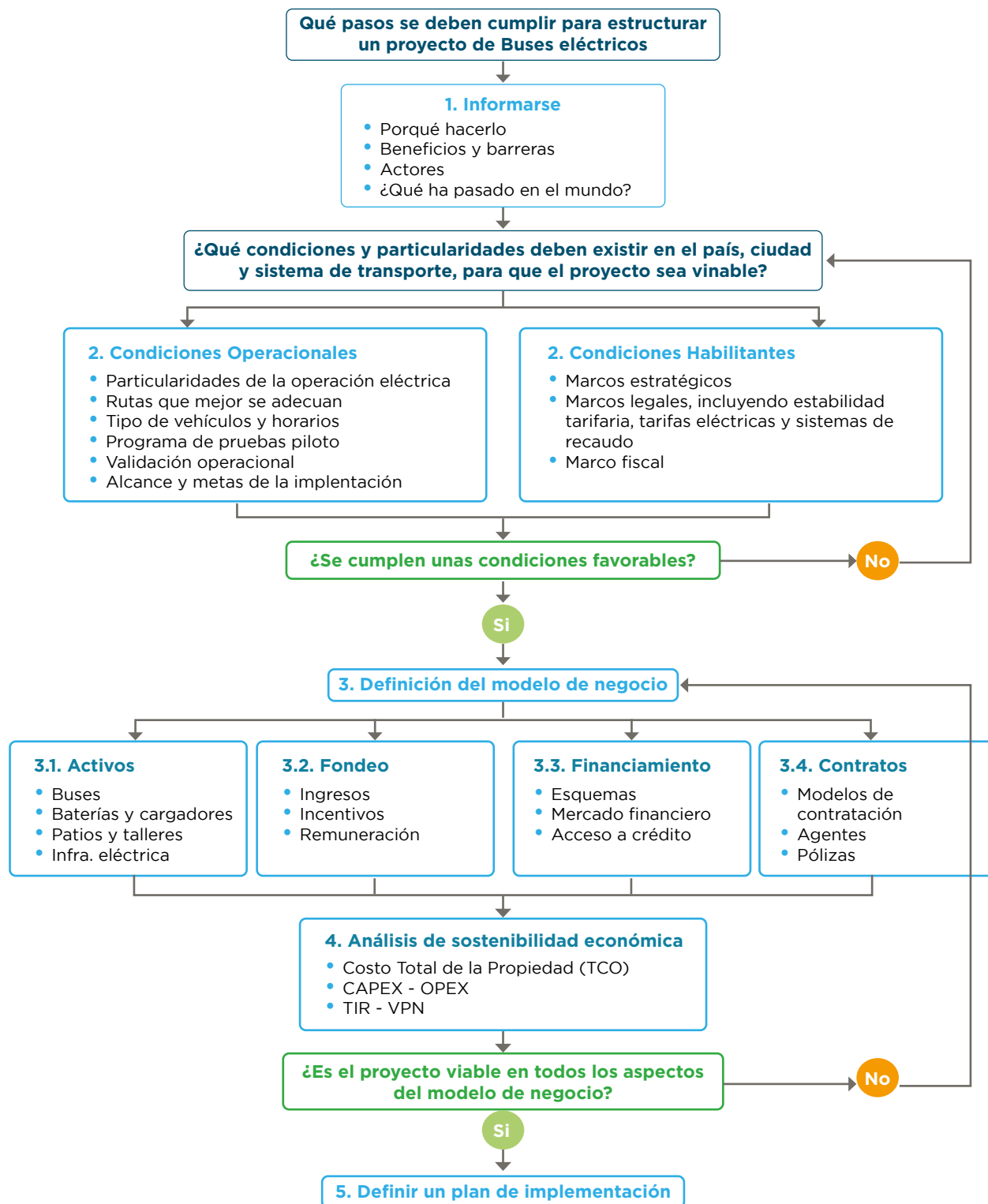
Este documento recopila los resultados, lecciones aprendidas y recomendaciones de los modelos de negocio que se han desarrollado en algunos países de Latinoamérica para la implementación de buses eléctricos; de tal manera que sirva como guía metodológica para autoridades de transporte, empresas del sector privado y gobiernos que estén interesados en la adquisición y puesta en operación de esta tecnología.

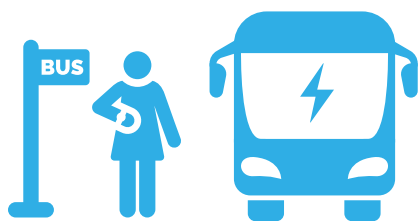
La figura 1 presenta un flujograma que resume paso a paso el proceso para llevar a cabo la estructuración de un proyecto de buses eléctricos de manera rigurosa. Posteriormente, se plantean una serie de preguntas claves que ayudan a orientar y sintetizar algunas acciones y resultados que se han venido desarrollando en la región, de tal manera que el lector pueda entender el contexto, retos y oportunidades para la electrificación del transporte público.



Figura 1

Flujograma Estructuración de Proyectos de Buses Eléctricos





¿Por qué implementar buses eléctricos en el transporte público?

La mayoría de las flotas de autobuses urbanos en el mundo operan con motores diésel que generalmente emiten altos niveles de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado fino (MP2.5), muy altas que a su vez es una de las principales fuentes de contaminantes nocivos. Estas emisiones empeoran la calidad del aire urbano y tienen un impacto directo en la salud de la población, por lo cual las opciones de movilidad sostenible se convierten en una necesidad y los vehículos eléctricos, incluidos los autobuses, son una opción prometedora para reducir las emisiones

nocivas, y evitar en el largo plazo, escenarios aún más perjudiciales de cambio climático.

Estudios desarrollados por el BID⁴ establecen que la implementación de flota eléctrica en 4 ciudades de LAC (Bogotá, Buenos Aires, Rio de Janeiro y Sao Pablo), bajo un escenario de 10 años y 30.000 buses diésel reemplazados, ayudarían con la disminución de emisiones contaminantes, incluyendo PM2.5; con la reducción de emisiones de CO2 y traerían mayor eficiencia en el gasto de combustible basado en una disminución del consumo de hasta un 77%, lo cual equivale a un total de 840 millones de galones, en el caso de aquellas ciudades donde el combustible es importado, la implementación de flota eléctrica puede traer también un ahorro económico por la reducción de la dependencia de combustibles fósiles importados. Además de estos beneficios, es importante mencionar que la electrificación del transporte público supone una ventaja en la sostenibilidad de estos sistemas a largo plazo, por la posibilidad de utilizar diversas fuentes de generación de energía.



¿Qué avances hay en la implementación de buses eléctricos en América Latina?

En LAC existen importantes esfuerzos, en su mayoría apoyados por el BID, para promover el uso de buses eléctricos dentro del transporte público, por lo que se han desarrollado varios pilotos y pruebas con el fin de recopilar información real que permita una mejor estructuración de los proyectos.

⁴ BID – C40 Cities. Low carbon technologies can transform Latin America's bus fleets. Abr-2013.

A la fecha, año 2020, sólo en Chile y Colombia se ha logrado poner en funcionamiento una flota significativa de buses con esta tecnología. Bogotá ha adjudicado 1.485 buses eléctricos, los cuáles se están incorporando de manera paulatina hasta 2022 a la operación de transporte en la ciudad, con lo cual

Colombia se convertiría en el segundo país con mayor cantidad de buses completamente eléctricos en el mundo, después de China. En el caso de Santiago, se han puesto 776 buses eléctricos de fabricación China (BYD, Fotón, Yutong y King Long).

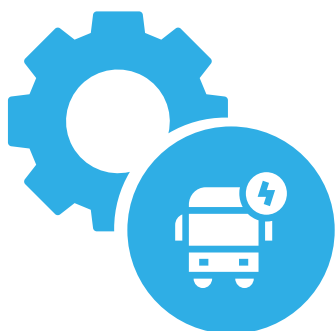


¿Qué características particulares tienen los buses eléctricos y su infraestructura?

Las tecnologías de buses eléctricos son reconocidas principalmente por sus bajas emisiones de carbono y tienen ciertas características especiales respecto a otras tecnologías. Cuentan con un mayor peso localizado debido a las baterías de tracción, por lo que la arquitectura del chasis y la carrocería debe ser planificado para garantizar el correcto reparto de pesos sobre los ejes delantero y trasero; además están equipados con un sistema de freno regenerativo, que al desacelerar el motor devuelve energía al inversor para que éste la transforme y entregue en las condiciones que las baterías la requieren

para el almacenamiento. Disponen también de menos componentes de fricción debido a una tracción sobre el eje casi directa, por lo cual se requiere menos lubricante para su operación, tienen menos filtros y requieren menor cantidad de refrigerantes para el funcionamiento, debido a la temperatura de trabajo. Finalmente, tienen un mayor rendimiento energético, por lo cual los costos asociados al uso de combustible son mucho menores.

Para la selección de la tipología y capacidad de la batería del bus eléctrico, se debe tener en cuenta, por un lado, una serie de variables operativas, como la longitud de las rutas y la topografía que cubrirán estos vehículos, las frecuencias, el rendimiento y el costo de adquisición de los buses y las garantías ofrecidas por los fabricantes en particular para las baterías. Por otro lado, es importante considerar también elementos como las baterías a utilizar, las diferentes posibilidades de carga, su rendimiento y vida útil, los tipos de cargadores con los que se suministrará la energía a los vehículos y los patios y talleres, donde además de estacionamiento para los buses pueden también servir como instalaciones de reparación y recarga de vehículos.



¿Qué modelos de negocio se han desarrollado en LAC?

La determinación del modelo de negocio es uno de los elementos centrales a la hora de estructurar y poner en marcha un proyecto de buses eléctricos; aunque no existe un modelo de negocio ideal o apropiado para todos los casos, existe gran cantidad de posibles combinaciones que se pueden desarrollar para garantizar que los diseños y escenarios se encuentren enmarcados bajo las condiciones particulares de cada proyecto y su entorno.

Por medio de diferentes estudios desarrollados con apoyo del BID, se han identificado estrategias y modelos de negocio propios para cada una de las ciudades beneficiarias de la asistencia técnica. Para el caso de Lima⁵, se obtuvo una preferencia clara por un modelo de negocio que separe la propiedad de la operación. En Bogotá⁶, se planteó una

licitación dual que separa la provisión de la flota de buses eléctricos de la operación, en donde la autoridad de transporte de la ciudad ha incorporado un mecanismo habilitador que permite reducir el riesgo financiero al inversionista y el riesgo tecnológico al operador.

En Medellín⁷ se optó inicialmente por un modelo de negocio en el que la adquisición de los activos se realiza de manera directa por el operador público, con recursos de la Alcaldía de Medellín. En este modelo el proveedor, en este caso BYD, se compromete a entregar los vehículos, junto con su infraestructura de recarga, conectada a la red eléctrica que es administrada por un agente público de propiedad de la misma Alcaldía. Este esquema tiene la ventaja de lograr costos operacionales muy bajos debido a que las entidades que intervienen en su mayoría son públicas, quienes no tienen una finalidad lucrativa en sus ejercicios.

En el caso de Costa Rica⁸, donde aún se encuentran en etapa de maduración, se ha planteado una hoja de ruta que contiene una combinación de modelos de negocios que facilitan la implementación desde una etapa inicial de transición de corto, mediano y largo plazo hasta una etapa de masificación. Costa Rica cuenta con condiciones favorables para la tecnología eléctrica como lo son incentivos tributarios impulsados por el gobierno, las tarifas de energía preferenciales para el transporte público y el apoyo por parte de los generadores de energía para facilitar a los operadores la conexión de cargadores.

⁵ Análisis y Diseño de Modelos de Negocio y Mecanismos de Financiación para Buses Eléctricos en Lima, Perú. BID, Ministerio de Energía y Minas de Perú y BASE, 2020 – Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

⁶ Costos y tarifas de remuneración por vehículo y por kilómetro, para vehículos eléctricos de la flota Troncal y No troncal de la Fase III del Sistema Integrado de Transporte Público SITP Banco Interamericano de Desarrollo – Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

⁷ Renovación tecnológica de la flota de Metroplús. WRI - Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

⁸ Hoja de ruta para la transición hacia buses eléctricos en, Costa Rica. BID – BASE. Cooperación Técnica RG-T3078.

También se incluyeron en los análisis los esquemas financieros para buses eléctricos diseñados por la banca estatal y productos preferenciales para esta tecnología ofrecidos por la aseguradora estatal.

El modelo diseñado para Buenos Aires⁹, igualmente con apoyo del BID, establece que el Gobierno Nacional a través del Ministerio de Transporte solicite financiamiento a la banca multilateral para apoyar la implementación de buses eléctricos por medio del apalancamiento/subsidio de la tasa de financiamiento ofrecida por la banca local/comercial, teniendo en cuenta las particularidades

inflacionarias y de la economía, por lo cual se requiere un alto apoyo en términos financieros por parte del estado.

Y finalmente, el modelo de negocio que permitió la implementación de un número considerable de flota eléctrica en la región ha sido el de separación de la propiedad de la operación, implementado en Santiago de Chile¹⁰ por medio de las empresas de energía ENEL y ENGIE. En él, las empresas de energía adquirieron la propiedad de los vehículos e infraestructura de recarga y de esta manera los operadores no requirieron realizar la inversión inicial que es la más considerable.



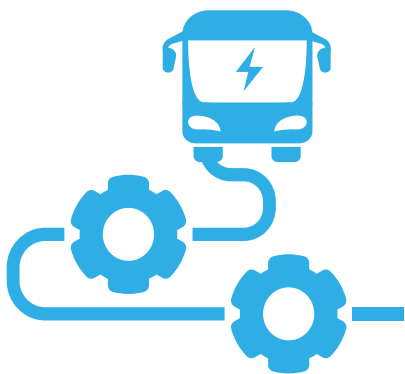
¿Cuáles son los esquemas de financiamiento utilizados en LAC?

Los esquemas de financiamiento dependen de las características del mercado y del mecanismo de adquisición que pueden ser por compra directa de los activos, donde el financiamiento puede ser con recursos

públicos directos para la compra inicial o la unión de esfuerzos con diferentes fuentes, dependiendo de la disponibilidad existente. Existe también financiamiento de deuda a operadores, gestores o entidades públicas, donde el esquema puede ser a través de préstamos comerciales, préstamos concesionales, internacionales de cambio climático o emisión de bonos verdes. Un último tipo de adquisición es mediante el arrendamiento o leasing, en donde pueden existir distintas variaciones del esquema de financiamiento, como el contrato de arrendamiento con opción de compra, el contrato de compra - arrendamiento, el arrendamiento de baterías, el arrendamiento operativo de largo plazo o el arrendamiento financiero. Hay que aclarar que el financiamiento en ocasiones puede darse por parte de entidades no financieras, como es el caso de los mismos fabricantes quienes han venido prestando este tipo de servicios bajo esquemas específicos.

⁹ Diseño de estrategias y mecanismos de financiación para buses eléctricos en Buenos Aires, Argentina. – Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

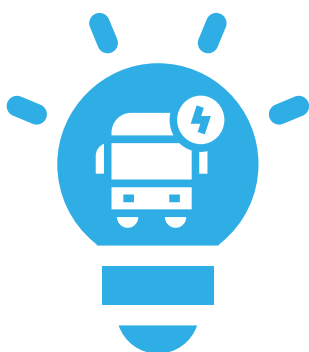
¹⁰ Análisis de rutas del transporte público potenciales a electrificar en Santiago de Chile, 2018. Centro Mario Molina Chile (CMM). Cooperación Técnica RG-T3078., BID.



¿Cuáles son los esquemas de contratación utilizados en LAC?

El esquema de contratación está estrechamente ligado con el modelo de negocio y el esquema de financiamiento definidos. En LAC se han identificado 4

escenarios bajo los cuáles se desarrollan los esquemas de contratación: (i) El primero es cuando la ciudad o autoridad de tránsito compra los buses y se encarga de la operación del servicio, es decir que la entidad pública opera los buses, corre con los gastos de adquisición y su operación y mantenimiento; (ii) existe también el esquema donde una entidad pública, como por ejemplo un gobierno o agencia local de tránsito, es propietaria de la infraestructura y gestiona el sistema, mientras que la operación y mantenimiento de flota se contratan a operadores privados, que son responsables de invertir en los buses eléctricos; (iii) un tercer esquema surgió recientemente, en donde el gobierno o autoridad de transporte y un operador privado se encargan de la operación de la flota, mientras que un tercero invierte en la flota de buses eléctricos; y finalmente, (iv) un esquema donde el gobierno es dueño de la flota y contrata la operación de los buses eléctricos a un privado.



¿Cuál es el beneficio de realizar pilotos para la implementación de buses eléctricos?

Incluir buses eléctricos en los sistemas de transporte supone retos importantes para

las ciudades, para las autoridades, los operadores e incluso para los usuarios. Estos retos tienen que ver principalmente con los costos de adquisición, los costos de operación, la incertidumbre sobre la capacidad de las baterías, los rendimientos, costos de mantenimiento, desempeño, costos de energía y de infraestructura, logística de carga de los vehículos, entre otros.

En este sentido, las autoridades y los gobiernos se enfrentan a la necesidad de conocer detalladamente los costos y beneficios potenciales durante la vida útil de un bus eléctrico antes de tomar la decisión de adquirirlo. Este ha sido el caso de ciudades como Colombia, Chile, Perú y Costa Rica entre otros.

En Medellín se realizó un piloto con un bus articulado 100% eléctrico con el fin de ejecutar pruebas antes de realizar el cambio total de la flota, que consistió en la implementación de 62 buses eléctricos. Con la información obtenida de las pruebas piloto se logró desarrollar un análisis de costo-beneficio, en donde a partir de elementos operativos reales se pudieron establecer características particulares para la adquisición, operación y financiamiento de las unidades.

El desarrollo de pruebas piloto constituye una valiosa estrategia para generar

confianza en la tecnología de buses eléctricos y evaluar aquellos factores que presentan incertidumbre y que dependen en gran medida de las características propias de las ciudades. Es importante que las pruebas piloto estén acompañadas de un plan de obtención de la información y de seguimiento de indicadores y resultados. Además se debe contar con una estrategia de difusión de resultados tanto a las autoridades como a los operadores de flota.



1.

Contexto Buses Eléctricos en Transporte Público



En Latinoamérica y el Caribe (LAC), el sector transporte es el más importante emisor de CO₂ generado por consumo energético, responsable del 35% de dichas emisiones, comparado al 24% de participación a nivel mundial¹¹. El transporte público, como alternativa principal de movilidad de las personas en las ciudades de la región (en promedio 38% del total de viajes)¹², es un servicio operado en su mayoría por vehículos con motores diésel que tienen emisiones de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado fino (MP2.5) muy altas que contribuyen con la mala calidad del aire en las ciudades de LAC.

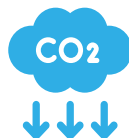
Estos datos se convierten en fuertes argumentos que ayudan a responder la pregunta: ¿por qué invertir en buses eléctricos y cuáles son los beneficios y barreras de adquirir este tipo de tecnologías?

Pues bien, los buses eléctricos son cada vez más comunes y su implementación se ha masificado en varias ciudades del mundo, motivados principalmente por el crecimiento en la preocupación sobre la calidad del aire urbano y las emisiones de carbono; aunado a un interés político por contrarrestar los efectos del cambio climático.

A medida que la población de las ciudades del mundo continúa creciendo, las opciones de movilidad sostenible se convierten en una necesidad latentes, por lo cual los vehículos eléctricos, incluidos los autobuses, son una opción prometedora para reducir las emisiones nocivas y mejorar la calidad del aire en las ciudades.

Algunos estudios desarrollados por el BID establecen que la implementación de flota

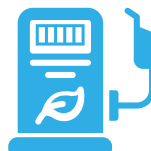
eléctrica en 4 ciudades de LAC (Bogotá, Buenos Aires, Rio de Janeiro y Sao Pablo), bajo un escenario de 10 años y 30.000 buses diésel reemplazados, traería como resultado:



Disminución de emisiones contaminantes, incluyendo PM2.5, con reducciones en promedio del 75%; equivalente a cerca de 1.650 Tons.



Reducción de emisiones de CO₂ en promedio del 26%, llegando a aproximadamente 10 millones de Tons.



Mayor eficiencia en el gasto de combustible basado en una disminución del consumo energético de hasta un 77% con la utilización de buses completamente eléctricos con baterías (consumo de combustible equivalente), lo cual equivale a un total de 840 millones de galones.

Sin duda, los buses eléctricos pueden contribuir a mejorar la movilidad sostenible, no sólo por sus beneficios ambientales, sino también por sus condiciones operacionales y de servicio. Por otra parte, resulta importante mencionar tanto los beneficios como las barreras que se han identificado para la implementación y masificación de los buses eléctricos dentro del transporte público, en el mundo y en LAC.

¹¹ BID - C40 CITIES. Low carbon technologies can transform Latin America's bus fleets. 2013.

¹² M. Moscoso, T. van Laake, L. Quiñones, C. Pardo, D. Hidalgo Eds. (2019). Transporte urbano sostenible en América Latina: evaluaciones y recomendaciones para políticas de movilidad. Despacio: Bogotá, Colombia.

Tabla 1

Principales Beneficios en la implementación de Buses Eléctricos

Especificación	Beneficios	Característica
Tecnológicos	No producen gases contaminantes y de GEI durante su funcionamiento.	Mejor calidad del aire y por consiguiente mejores condiciones de salud para los habitantes.
	Generan menos ruido y menos vibraciones.	Mayor confort del viaje para los usuarios y reducción de la contaminación sonora.
	Consumen energía que se genera en su mayoría de fuentes renovables (en LAC).	Menor impacto ambiental y reducción en el uso de combustibles fósiles.
	El motor eléctrico ocupa menos espacio y es más versátil.	Mejor aprovechamiento del espacio y distribución, ganando comodidad y confort.
Operacionales y Financieros	Bajo costo de operación. El ahorro promedio en el costo de combustible puede estar entre 65%+/-15%.	Mayor rentabilidad para la operación.
	Menor costo de mantenimiento por el tipo de motor y cantidad piezas que componen el vehículo.	Menores costos operativos y de recursos humanos.
	Exenciones de impuestos y mejores condiciones de crédito por el uso de tecnologías limpias.	Mejora en indicadores financieros y de inversión en los modelos de negocio.
	Menor Costo Total de Propiedad (TCO).	Mejores condiciones económicas
Otros	Desarrollo de un mercado laboral para tecnologías limpias, con una transición hacia una economía verde.	Desarrollo productivo y económico, reflejado en nuevas fuentes de empleo.

Fuente: BID a partir de consultorías de apoyo a la implementación de buses eléctricos en la región y literatura internacional.

* Análisis y Diseño de Modelos de Negocio y Mecanismos de Financiación para Buses Eléctricos en Lima, Perú. BID, Ministerio de Energía y Minas de Perú y BASE, 2020 – Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

Tabla 2

Principales Barreras en la implementación de Buses Eléctricos

Barreras Identificadas	
Activos	<ul style="list-style-type: none"> • Incertidumbre sobre los aspectos técnicos, legales y financieros de los vehículos, con lo cual se puedan tomar decisiones de manera informada. • Limitaciones de autonomía en los buses para algunas rutas con alta pendiente o largos recorridos diarios. • Falta de estandarización y pruebas operativas. • Fabricantes con poca experiencia probada. • Falta de información sobre “como iniciar” la implementación de un proyecto de buses eléctricos. • Incertidumbre sobre la capacidad operacional de los vehículos. • Necesidad de adaptar la operación a las características funcionales de los vehículos. • Falta de escalabilidad, más allá de los proyectos pilotos. • Desconocimiento de la capacidad del suministro eléctrico o e infraestructura de recarga. • Falta de puntos de carga por fuera de los patios y talleres. • Inestabilidad de la red eléctrica para soportar las necesidades del sistema de buses. • Falta de estándares y regulaciones para infraestructura de carga. • Falta de tierras o espacio para la construcción de la infraestructura de carga.
Fuentes/Fondos	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de planes, programas y fuentes de recursos para la renovación vehicular, que permitan incorporar buses eléctricos. • Falta de políticas claras y articuladas que promuevan e incentiven la adopción de buses eléctricos. • Alta informalidad en los sistemas de transporte, lo cual afecta los ingresos de los sistemas formales. • Inadecuada distribución de los subsidios, teniendo en cuenta los beneficios de cada tecnología. • Falta de garantías claras sobre la remuneración que minimice el riesgo de fluctuación de demanda. • Falta de un marco que compense las pérdidas que genera la transición, por ejemplo el menor recaudo de impuestos por venta de gasolina.

Barreras Identificadas	
Financiación	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo de adquisición inicial, comparado con otras tecnologías. • Falta de opciones de financiamiento, de acuerdo con las necesidades particulares de cada proyecto y modelo. • Rápida depreciación de los activos tecnológicos, por su constante evolución. • Incertidumbre sobre tarifas de energía eléctrica. • Alto costo de adquisición de la infraestructura de carga, incluyendo la adecuación de la red eléctrica. • Desconocimiento del costo de la batería de reemplazo. • Desconocimiento del valor residual de la batería o de su segundo uso o disposición.
Contratos	<ul style="list-style-type: none"> • (de lenguaje) y de legislación. • Modelos financieros y de negocio rígidos, que no tienen en cuenta en las licitaciones el Costo de Propiedad (TCO). • Negativa percepción pública ante la falta de información. • Constante necesidad de articulación entre la autoridad y el operador. • Distribución de responsabilidad frente al mantenimiento y adecuación de la red de distribución eléctrica requerida. • Falta de planificación de la infraestructura en el largo plazo. • Limitadas capacidades institucionales para la gestión, promoción y contratación de proyectos con este tipo de tecnología.

Fuente: Adaptado a partir de: BARRIERS TO ADOPTING ELECTRIC BUSES. WRI - BID a partir de experiencias en LAC.

1.1. Buses Eléctricos en el Mundo y en LAC

Con el fin de identificar buenas prácticas y mecanismos exitosos en la implementación de la tecnología eléctrica, es recomendable analizar las experiencias en el mundo y a mayor detalle las experiencias en la región y países vecinos. En este sentido,

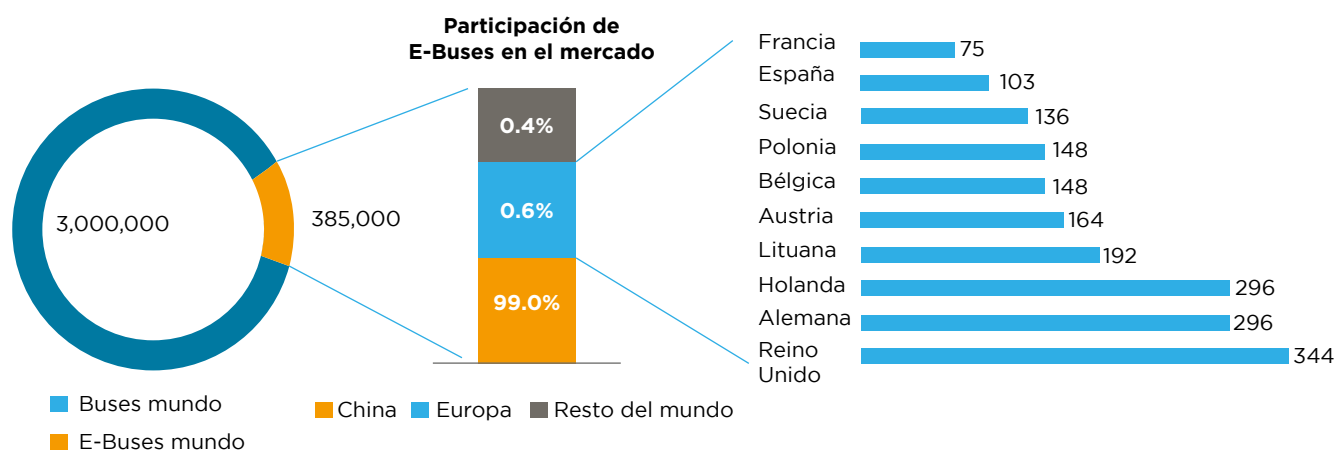
las cifras son positivas, cada vez son más las ciudades que están considerando su implementación como una alternativa más eficiente y sostenible, por encima de los buses diésel y GNV convencionales. A pesar del reciente crecimiento en el mercado, la implementación mundial es geográficamente desigual y en una escala bastante limitada. Para 2016, más de 40 ciudades en todo el mundo contaban con buses eléctricos en sus sistemas de transporte, sin embargo, el 87% de

estas estaban ubicadas en la China¹³. Actualmente, Shenzhen es el hogar de la mayor flota de buses eléctricos urbanos del mundo, con un sistema 100% electrificado compuesto por cerca de 16.000 unidades, que fueron introducidas en un lapso de tiempo de aproximadamente 6 años (2011-2017).

Para 2019 el número de buses eléctricos en el mundo era cercano a las 421.000 unidades de las cuales el 99% se encuentran en China, en donde el éxito en su implementación se

atribuye principalmente a una adecuada combinación de estrategia de ventas, subsidios, modelo de negocio y los objetivos regionales de descontaminación. En este mismo año, la flota de buses eléctricos e híbridos del país representó el 17% del total de flota. En Europa el total de buses eléctricos se estimó cercano a las 2.250 unidades, alcanzando una participación del 1,9% del mercado en el 2019; mientras en Estados Unidos hay un total de 630 unidades, aunque la participación total en el mercado sólo alcanzó el 1,1%¹⁴.

Figura 2
Mercado mundial de buses eléctricos en 2017



Fuente: Análisis y Diseño de Modelos de Negocio y Mecanismos de Financiación para Buses Eléctricos en Lima, Perú. BID, 2020 - Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

En LAC existe una gran intención y esfuerzos en promover el uso de buses eléctricos dentro del transporte público, en línea con los objetivos de contribuciones determinadas nacionalmente. En Chile y Colombia se ha logrado poner en funcionamiento una flota significativa

de buses con esta tecnología. Santiago ha puesto 788 buses eléctricos de fabricación China (BYD, Foton, Yutong y King Long); mientras en Medellín, Cali y Bogotá se encuentran en operación 64, 26 y 351 buses, respectivamente¹⁵, para complementar la flota de los Sistemas

¹³ Agencia Internacional de Energía, 2017

¹⁴ Bloomberg Finance L.P. Electric Buses in Cities. Driving Towards Cleaner Air and Lower CO2. 2018

¹⁵ <https://www.ebusradar.org/>

Tabla 3

Cantidad de Buses Eléctricos en LAC

País	Ciudad	Fabricantes	Estado (2020)	Año de Entrada	Cantidad
Argentina	La Rioja	BYD	Estructuración	Por definir	50
Argentina	Buenos Aires	Yutong, Zhongtong, King Long y Higer Bus	Piloto	2019	8
Chile	Santiago	BYD, Foton, Yutong y King Long	Operación	2019	788
Brasil	Sao Pablo	BYD	Operación - Piloto	2019	15
Ecuador	Guayaquil	BYD	Operación - Piloto	2019	20
Perú	Lima	BYD, QEV-Modasa y	Piloto	2019	3
Panamá	Ciudad de Panamá	BYD	Piloto	2019	2
Colombia	Medellín	BYD	Operación	2019	64
		Sunwin	Operación	2019	26
Colombia	Cali	Por definir	Adjudicados	Por definir	136
Colombia	Bogotá	BYD, Yutong	Adjudicados	2021/2022	1.485
Colombia	Bogotá	BYD, Yutong	Operación	2021	260
Costa Rica	San José	Por definir	Estructuración	Por definir	3
Uruguay	Montevideo	Yutong	Operación	2020/2021	32

Fuente: Fuente: Análisis y Diseño de Modelos de Negocio y Mecanismos de Financiación para Buses Eléctricos en Lima, Perú - Cooperación Técnica RG-T3078 - BID con información de otros estudios y procesos de licitación.

Para 2020 y el primer semestre de 2021, en LAC están rodando cerca de 1.200 buses eléctricos de los cuales 1.100 corresponden a las operaciones regulares de los sistemas en Santiago, Bogotá, Medellín y Cali; mientras el restante corresponde a proyectos piloto. Así mismo hay un potencial grande de implementación, principalmente en Cali y Bogotá en donde ya se encuentran adjudicados 1.621 buses eléctricos que entrarán en operación en el corto plazo, o que se encuentran en implementación gradual como es el caso de Bogotá, con lo cual se incrementará la totalidad de buses existentes en la región.

Para que estas cifras estén en constante crecimiento, se ha invertido gran

cantidad de recursos en estudios y análisis necesarios para orientar las particularidades de la tecnología a las condiciones específicas de cada ciudad; y así, romper con las brechas que existen, donde gran parte de ellas son generadas por los factores de incertidumbre que aún persisten. En esta labor, el BID ha sido un aliado estratégico para las ciudades, no sólo en términos de financiación, sino también en apoyo técnico para desarrollar las capacidades necesarias al interior de las diferentes entidades encargadas de poner en marcha cada uno de los proyectos. En este sentido se han destinado recursos a través de cooperaciones técnicas para la realización de actividades preparatorias, estudios y asistencia técnica antes de la

implementación; junto con el apoyo en la estructuración definitiva de proyectos, preparación de ofertas y procesos de contratación, con lo cual se busca entre otros, generar capacidad institucional para la futura masificación de tecnologías 100% limpias dentro del transporte público.

1.2. Actores que intervienen en los proyectos de Buses Eléctricos

Cabe resaltar que las autoridades de transporte, los fabricantes y los operadores de transporte no son los únicos actores que influyen en el desarrollo de un proyecto de ascenso tecnológico. Existen otros agentes que impactan directa o indirectamente debido al papel que juegan en variables claves como el apoyo político, los mecanismos de financiación y las regulaciones aplicables. En este sentido, es importante identificar a todos los actores de manera temprana para establecer mecanismos de colaboración. Pueden existir actores directos, actores indirectos y actores externos.

Los actores directos son aquellos involucrados en el día a día de la operación, sostenibilidad y puesta en marcha del sistema.



Agencia Ejecutora o Ente Gestor: responsable de planear, gestionar y en algunos casos, operar el sistema de buses.



Operador de transporte: encargado de prestar el servicio a través de un contrato o delegación, y quien asume la mayor responsabilidad en la puesta en marcha de los buses eléctricos.



Líderes políticos: quienes impulsan los proyectos desde una perspectiva pública, destinando recursos para su promoción y desarrollo.



Distribuidor de energía: empresa de servicios públicos encargada de proveer la energía para el proyecto.



Autoridad Local: encargada de controlar la prestación del servicio y velar por su adecuado funcionamiento.



Usuarios: quienes utilizan los buses eléctricos y generan la opinión pública sobre el desempeño del proyecto.

Los actores indirectos son aquellos encargados de proporcionar los activos, servicios o regulaciones necesarias para la puesta en marcha del sistema de buses eléctricos.



Fabricantes: quienes producen los vehículos y todos sus componentes.



Financiadores: encargados de proporcionar los fondos y productos financieros para la adquisición y operación del sistema.



Autoridades nacionales: quienes regulan la industria y pueden desarrollar políticas para su adopción y promoción. Pueden ser de varios sectores como el comercio, energía, transporte o medio ambiente.

Proveedores de servicios:



encargados de la construcción, operación y mantenimiento de la infraestructura de carga para los vehículos. Puede ser el mismo distribuidor de energía dependiendo de su alcance.

Y finalmente están los actores externos, interesados en la adopción de los sistemas de buses eléctricos desde una perspectiva intelectual y de promoción, vinculada a la generación de conocimiento y apoyo para el desarrollo de nuevos proyectos.



2.

Condiciones Operacionales de los Buses Eléctricos



Uno de los aspectos más importantes a considerar para la estructuración de un programa de buses eléctricos, es identificar las condiciones bajo las cuáles se desarrollará la operación de estos vehículos; esto incluye conocer las características de topografía y trazado de las rutas en donde se espera operar con esta tecnología, la demanda a atender, los horarios de prestación del servicio y otros aspectos operacionales que se explicarán en este capítulo.

Las variables operacionales a estudiar, más adelante ayudarán a definir elementos de importancia, como las características del bus a escoger y la configuración de carga de la batería que mejor se adecúa. De esta manera se debe analizar en principio lo siguiente:

- **Longitud de las rutas:** A mayor longitud de rutas, sin posibilidad de hacer recargas dentro del trayecto, mayor será la capacidad requerida de las baterías.
- **Topografía de las rutas:** Si se presentan pendientes pronunciadas en el trayecto, será necesario disponer de tamaños de vehículos adecuados y potencias para lograr dichos recorridos.
- **Demanda:** Según la cantidad de pasajeros a transportar se deberá escoger la tipología que mejor se adecue, para tener unas frecuencias que permitan un servicio óptimo.
- **Uso de calefacción o aire acondicionado:** Dependiendo de las condiciones climáticas requeridas, este será un factor a tener en cuenta para el dimensionamiento de la batería, ya que al usar elementos de climatización es mayor la energía requerida.
- **Tipo de operación a desarrollar:** En sistemas BRT (Bus Rapid Transit) donde

los buses tienen carriles exclusivos y pueden desarrollar velocidades operacionales superiores, se requerirán baterías de menor capacidad; debido a que los ciclos de aceleración y frenado serán menores que en operaciones con tráfico mixto en donde al compartir el espacio vial con otros vehículos se desarrollan menores velocidades.

En conjunto, el análisis operacional de todas estas variables será determinante para definir el tipo de vehículo, la capacidad de la batería y el tipo de carga a utilizar, para de esta manera determinar una alternativa costo – eficiente. Así mismo, estas variables permiten realizar una mejor planeación de la operación, escoger la ruta más óptima y aquellas donde se pueda aprovechar al máximo el potencial de ahorro de este tipo de vehículos.

Sobre la identificación de parámetros operacionales para buses eléctricos, el Banco ha venido apoyando proyectos específicos como el de Medellín y Santiago en donde los aportes se han centrado principalmente en los análisis operacionales que permitan viabilizar una operación eléctrica.

Se destacan también, los casos de Cali y Ciudad de Guatemala, que son procesos más recientes y en ejecución, en donde se vienen analizando las particularidades operacionales de cada sistema, seleccionando las posibles rutas a electrificar, definiendo necesidades en términos energéticos e identificando la mejor opción en términos contractuales para su desarrollo. Estos proyectos sin duda, se configuran en un reto no sólo financiero para las ciudades, sino también técnico y tecnológico, debido a las particularidades que requiere la operación y a las capacidades que es necesario desarrollar en torno a los mismos.

2.1.

Esquemas de Operación y Carga

2.1.1.

Estrategias de Carga

Un factor que se debe tener en cuenta en la operación de buses eléctricos es definir, entre las diferentes posibilidades que existen en el mercado, la mejor estrategia de carga.

Hoy en día la más popular es la carga lenta que se realiza durante la noche en los patios, este es el caso de sistemas como el de Cali. Este tipo de solución, es la más económica y tiene la gran ventaja de poder realizar las operaciones de carga en las horas nocturnas cuando los precios de la electricidad son más bajos. A pesar de estos aspectos positivos, también tiene algunos retos relacionados con depender de la carga en los patios:

- Limitaciones de espacio para la instalación de cargadores, lo cual se agudiza con el tamaño de la flota.
- Restricciones de capacidad para conectar todos los buses al mismo tiempo.
- Necesidad de paquetes de baterías más grandes, lo que se traduce en mayores costos de capital, e incremento en el peso del vehículo lo cuál puede afectar la capacidad de movilizar pasajeros.
- Mayor peso de baterías lo cual puede afectar la capacidad de pasajeros a movilizar.

Se tiene el caso de Santiago donde, se cuenta con un sistema de carga en el que se realizan cargas intermedias en el día, además del sistema de carga durante la noche.

Otro tipo de estrategia es la combinación de cargas en el patio y recargas rápidas en puntos de conexión específicos en la terminal o las estaciones de parada. A continuación, se presenta una comparación de las diferentes estrategias de carga, resaltando sus ventajas, desventajas y los costos cualitativos asociados.



Tabla 4
Estrategias de carga para Buses Eléctricos

Tipo de Carga	Costo de Infraestructura	Requisitos de la Batería	Costo total del Sistema
Carga lenta durante la noche en patio	Bajo Solo se requieren cargadores en los patios, pero la relación cargador / bus es alta.	Alto Baterías de mayor capacidad para poder cubrir su ruta diaria con una sola carga. Esto implica mayores costos en la batería.	Medio El costo de la batería es lo mas relevante en el sistema, pero a medida que este disminuyen con el tiempo, el costo total puede reducirse. Al utilizar tarifas nocturnas para cargar, los ahorros en costos de energía pueden ser significativos.
Carga lenta en patio y carga rápida en terminal	Medio Se requieren dos tipos de cargadores en dos lugares diferentes.	Medio Los buses tienen varias opciones de carga durante el día por lo cual requieren paquetes de baterías mas pequeñas.	Medio El mayor costo de la carga rápida se equilibra con los ahorros de una batería más pequeña. Pueden requerirse cambios en la operación normal del bus para hacer la carga rápida, pero en teoría el tiempo de parada debería ser suficiente.
Carga súper rápida en terminales y paradas (inalámbrica / pantógrafo solamente)	Alto Los sistemas de carga por pantógrafo o inalámbricos son los mas costosos en la actualidad.	Bajo No se requieren grandes paquetes de baterías ya que los buses se cargan durante la ruta.	Alto La carga inalámbrica es muy costosa actualmente, pero no impacta tanto la operación; sin embargo, su instalación es exclusiva para una única ruta y debe cubrir la mayor parte de esta, lo que limita la flexibilidad.
patio y pantógrafo en ruta	Alto Los sistemas de pantógrafo siguen siendo costosos hoy en día.	Medio Como los buses pueden cargarse durante el recorrido pueden tener paquetes de baterías pequeños.	Medio Tecnología muy costosa, pero que puede utilizarse en varios buses al tiempo. La instalación de pantógrafos está dedicadas a una sola ruta lo que limita la flexibilidad.

Fuente: Bloomberg New Energy Finance

En los diferentes proyectos de buses eléctricos que se vienen estructurando e implementando en LAC se ha optado por la carga lenta y en patio como la alternativa que mejor responde a las necesidades operacionales de los sistemas; impulsada principalmente por sus costos de implementación y la incertidumbre que representa para los operadores de transporte las demás estrategias y la falta de regulación y estandarización.

Para el sistema de carga rápida son utilizados elementos como los pantógrafos que pueden tener un índice mayor de falla y que por su elevado costo, resulta difícil contar con elementos de respaldo.

Sobre el tipo de carga lenta en patio con instalación de pantógrafos en la ruta, es importante considerar que estos elementos pueden estar expuestos a daños o vandalismo por encontrarse en espacios públicos.

2.1.2.

Dimensionamiento de flota y asignación horaria

En términos generales el dimensionamiento de flota para la tecnología de buses eléctrico se puede realizar de forma similar que en cualquier otra tecnología. Se analizan variables como la demanda de pasajeros, el número de pasajeros por metro cuadrado límite, las frecuencias máximas deseadas, la flota de reserva

necesaria y los tipos de buses disponibles en términos de su capacidad.

A pesar de estas similitudes, en el caso de los buses eléctricos es necesario tener en cuenta el tiempo requerido para su carga, ya sea nocturna o diurna, lo cual puede impactar en la disponibilidad del vehículo, por lo cual puede ser necesario contar con algún vehículo adicional que cubra las necesidades del servicio.

Además del dimensionamiento de la flota y para lograr eficiencia de los vehículos eléctricos es importante realizar una asignación horaria, ya que de ello dependerá la correcta cobertura de la demanda y la futura programación para modelar adecuadamente la recarga de energía en patios. En conclusión, en esta etapa lo que se busca es identificar claramente en que fracción del día cada bus va a estar en operación y en que momento podría disponerse de él para hacer su recarga, y así optimizar los recursos disponibles tanto en términos de buses como de cargadores.

En el caso de Metroplús en Medellín, con el fin de caracterizar el servicio de acuerdo al rendimiento y eficiencia de los vehículos, se modelaron las programaciones diarias bus a bus para distintos escenarios, con el ánimo de identificar cual era el óptimo en términos de servicio y necesidades energéticas.

Ejemplo Metroplús de asignación de periodos de operación y recarga por bus

[illegible]

Fuente: WRI - Cooperación Técnica RG-T3078. Renovación tecnológica de la flota de Metroplús

de tiempo, que a su vez es la base para definir el número de cargadores necesarios. Lo anterior dependerá también de las características del cargador, por lo cual es recomendable realizar comparaciones entre los fabricantes disponibles en el

mercado, de tal forma que se logre una adecuada relación costo – beneficio. Tener muchos cargadores pueden implicar mayores inversiones en términos de

infraestructura energética y espacio (en patios principalmente), pero tener pocos cargadores puede no ser eficiente para lograr varias cargas de forma simultánea.

Tabla 6

Ejemplo Metroplús – Requerimiento de cargadores por alternativas de fabricantes según operación definida

Marca	Flota Operativa	Almacenamiento Energético (kwh)	Rendimiento (kwh/km)	Rendimiento (kwh/km)	Autonomía (Sin A/C)	Potencia de cargador (kw)	Tiempo de carga	Cargadores
BYD	60	66	330	0.85	1.18	384	80	14
BYD	60	66	330	0.85	1.18	384	200	8
Zhongtong	60	66	314	1.395	0.72	237	374	6
Suwin	60	66	295	0.8	1.25	300	120	9
Foton	60	66	303	0.98	1.02	320	150	8
Foton	60	66	303	0.98	1.02	320	375	4
k. -Yutong	60	66	324	1	1.00	350	150	8

Fuente: WRI - Cooperación Técnica RG-T3078. Renovación tecnológica de la flota de Metroplús

Los datos presentados, corresponden a cálculos realizados para el caso de Metroplús en la ciudad de Medellín, para las rutas de la ciudad, por lo que se trata de valores de referencia que se mencionan como ejemplo de requerimiento de cargadores para cada alternativa y por cada fabricante.

Otro aspecto importante a considerar a la hora de realizar el dimensionamiento de la infraestructura de recarga, es la cantidad de buses necesarios para cubrir la ruta o el sistema en conjunto, ya que esto impacta en las opciones de infraestructura de carga. Por ejemplo, la infraestructura de carga súper rápida, junto con las opciones en ruta pueden no ser suficientes para atender la cantidad de buses por unidad de tiempo en un punto específico, afectando la prestación del servicio. En este sentido, la estrategia operativa debe planificarse de modo tal que haya cierta capacidad de reserva en las baterías de cada bus (en caso de sobresaturación en los puntos de carga), y que los autobuses de reserva estén disponibles.

Para el desarrollo de proyectos de buses eléctricos en LAC, aparte de los análisis teóricos que se puedan realizar a partir de la información disponible en el mercado, se han puesto en marcha proyectos piloto y modelaciones de la operación, las cuáles pueden ser muy útiles para lograr una exitosa estructuración de un proyecto de buses eléctricos. En la mejor practica, se complementan ya que los pilotos ayudan a validar y adaptar mejor las simulaciones o modelaciones y éstas a su vez permiten hacer un análisis mucho más extenso en cobertura y tecnologías a menor costo y ayudan en la planificación de los pilotos y la validación de los KPIs del proyecto.

Proyectos piloto

A través de pruebas piloto se busca conocer el desempeño de los buses eléctricos bajo condiciones operacionales definidas y con diferentes capacidades de baterías, para de esta forma obtener información que permita establecer que características son las que mejor se adecuan al servicio que se va a prestar.

Las pruebas piloto permiten a las ciudades, generar confianza sobre las nuevas tecnologías y construir sistemas de transporte que tengan un grado de control y estabilidad suficiente para garantizar el éxito del sistema y un buen nivel de servicio para los usuarios.

Estos pilotos se desarrollan por lo general en varias rutas y con diferentes tipologías, de tal forma que se puedan identificar desempeños, ventajas y desventajas en la operación; a la vez que se logra adquirir conocimiento respecto al funcionamiento de la tecnología por parte de conductores, mecánicos y empresarios.

El Banco ha venido apoyando algunos pilotos, como por ejemplo el desarrollado en Buenos Aires a partir del cual se logró, con información recopilada en campo, el diseño y estructuración de costos para la posible operación de flota eléctrica en algunas rutas específicas.

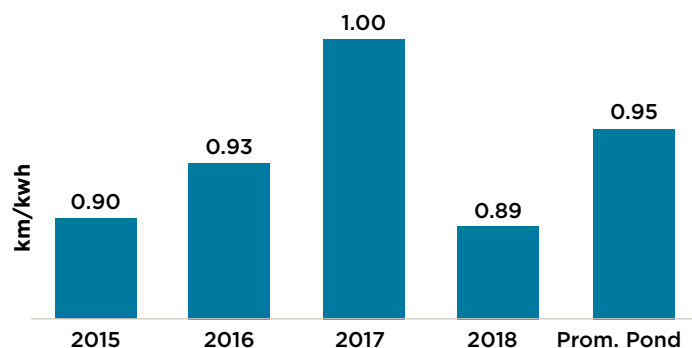
En Chile entre 2016 y 2017, se realizaron pruebas piloto de buses eléctricos en Santiago con la cooperación de ENEL,

proveedor de energía eléctrica. Como resultado de este piloto y según información de los operadores, los vehículos alcanzaron un rendimiento de 0.93 Km/kWh sin aire acondicionado, dato que fue de total relevancia para la estructuración final del proyecto y con lo cual se logró en 2019 el inicio de la operación de los primeros 100 buses eléctricos en la ciudad. ENEL actuó como agente financiero y proveedor de energía, y arrendó los autobuses a Metbus durante 10 años; Metbus, a su vez, opera los autobuses y proporciona mantenimiento básico.

En Bogotá, donde en compañía del BID se realizó la evaluación de la prueba piloto de un bus eléctrico, se pudo construir un análisis comparativo de los rendimientos indicados por los fabricantes y distribuidores de buses eléctricos locales, respecto a los parámetros arrojados por un bus que se encuentra en operación desde 2015. La operación de este bus eléctrico, del fabricante BYD, mostró los siguientes rendimientos energéticos entre 2015 y 2018:

Figura 3

Rendimiento energético del bus eléctrico piloto en Bogotá D.C.



Fuente: Costos y tarifas de remuneración por vehículo y por kilómetro, para vehículos eléctricos de la flota Troncal y No troncal de la Fase III del Sistema Integrado de Transporte Público SITP Banco Interamericano de Desarrollo – Cooperación Técnica RG-T3078, BID

Estos valores de rendimiento energético dependieron en gran medida de las características de las rutas en las cuáles operaron los buses eléctricos y del seguimiento y capacitación realizadas a los conductores. En este caso de Bogotá, la prueba piloto se desarrolló sobre la ruta Porvenir-Pinares que presentaba un 61% del recorrido en baja pendiente, 19 % en media pendiente y 20 % en alta pendiente. Producto de este ejercicio se realizó una

estimación para determinar cuál podría ser el rendimiento promedio entre fabricantes. Para esto se determinó la proporción entre la experiencia en la prueba piloto de BYD y su referencia, encontrando una diferencia de 10%. Al emplear la diferencia del 10% con la referencia de los demás fabricantes analizados, se estimó que el rendimiento promedio para otros fabricantes sería de 1 km/kWh.

Tabla 7
Rendimiento promedio estimado entre fabricantes

BYD Referencia	BYD Experiencia	Diferencia
1.06	0.95	10%
Considerando la Experiencia Local		
SUNWIN	1.06	km/kWh
Yutong	1.00	km/kWh
Promedio	1.00	km/kWh

Fuente: Costos y tarifas de remuneración por vehículo y por kilómetro, para vehículos eléctricos de la flota Troncal y No troncal de la Fase III del Sistema Integrado de Transporte Publico SITP Banco Interamericano de Desarrollo – Cooperación Técnica RG-T3078, BID

Modelación de la operación

Esta herramienta permite el diseño y optimización de componentes y vehículos, estimando consumos de energía y análisis de rendimientos para distintas configuraciones de un vehículo, incluyendo:

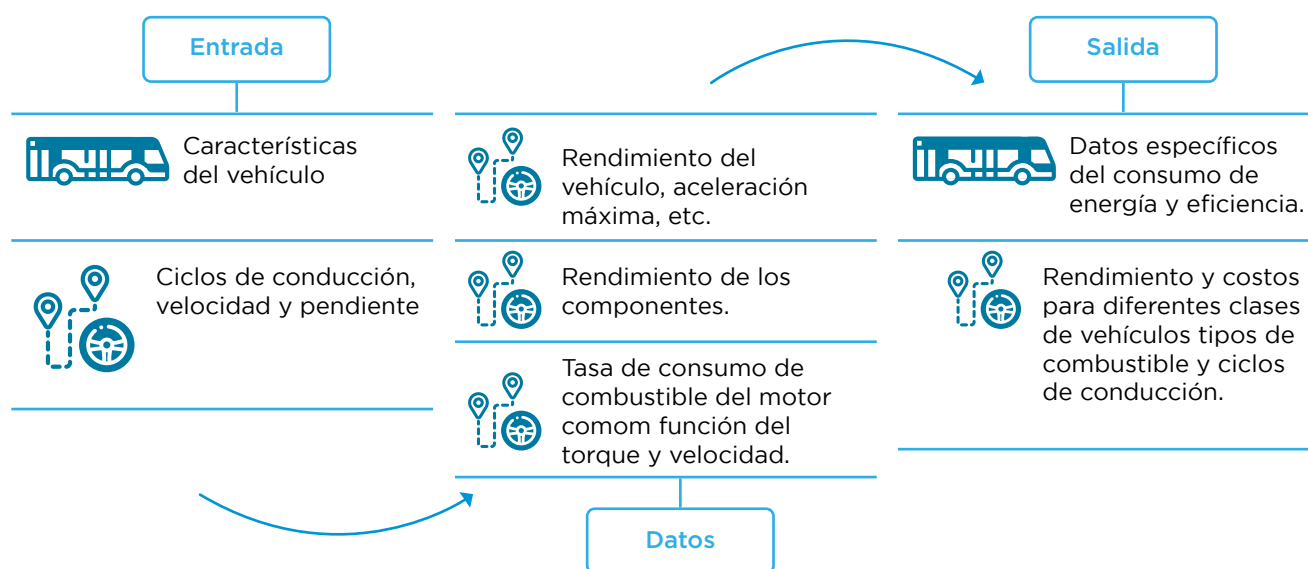
- Impacto en el dimensionamiento de componentes para distintos sistemas de propulsión, así como para definir los requisitos de los componentes como potencia y energía.
- Impacto en tecnologías de componentes (como transmisiones avanzadas, motor, diferencial, ruedas, baterías, etc.)
- Comparación entre distintas configuraciones de sistemas de propulsión como vehículos eléctricos convencionales, vs vehículos híbridos, vs vehículos eléctricos híbridos enchufables, vs vehículos eléctricos híbridos con pila de combustible, etc.

La herramienta simula el comportamiento de un vehículo virtual operado en una ruta y bajo condiciones definidas por el usuario. Para esto se debe desarrollar un modelo virtual del vehículo a partir de la configuración de cada uno de sus componentes y sistemas, que para el caso de un vehículo eléctrico corresponden

al motor, sistema de transmisión, diferenciales, ruedas, neumáticos, controlador, baterías, pesos, dimensiones, y aerodinámica. Posteriormente se debe configurar el ciclo de conducción en el cual se desea evaluar el vehículo, ingresado velocidad y pendiente por segundo, más las condiciones ambientales.

Figura 5

Metodología general para la simulación de buses



Fuente: Consultoría para la determinación del número de buses con potencial de ser eléctricos para incorporar al Sistema de Transporte Público de Santiago, 2018. Centro Mario Molina Chile (CMM). Cooperación Técnica RG-T3078

Esta herramienta fue utilizada en Santiago de Chile, en el marco del apoyo que presta el Banco para la financiación de estudios encaminados a la puesta en marcha de buses eléctricos en la región; a partir de dos modelos virtuales basados en las configuraciones de los buses BYD modelo K9 y Yutong E12, con lo cual se pudo analizar 20 rutas bajo varios escenarios de carga

y pasajeros, obteniendo para cada una de ellas distancias de recorrido, duración de ciclos y consumo energético (kWh/km). Estos datos son de total relevancia para establecer las especificaciones técnicas del bus que mejor se adecua a las condiciones de la ruta y así definir las características para los procesos de licitación respectivos.

2.2.

Rutas

2.2.1.

Evaluación de rutas con mayor potencial de ser electrificadas

Escoger adecuadamente las rutas a electrificar es un punto relevante dentro del diseño de un sistema de buses eléctricos, porque como se ha mencionado, las características de las mismas impactan en la eficiencia de este tipo de tecnologías. Es necesario preguntarse si, cualquier tipo de ruta puede ser operada por un bus eléctrico, o ¿cuáles de las rutas o recorridos del sistema puede tener un mejor potencial y puede lograrse una mayor eficiencia?, para resolver esos interrogantes, se deben analizar los siguientes principios:

- **Productividad**

Garantizar que el tamaño de la flota y el número de conductores no se aumenten al electrificarse y que los costos no se incrementen significativamente.

- **Operación**

Los buses eléctricos deben operar con estándares de frecuencia y regularidad

similares a los de los buses diésel. Por ejemplo, en el caso de Transantiago se exige un indicador mínimo de 90% de frecuencia y un 80% para regularidad, lo cual se debe garantizar también con esta tecnología.

- **Confiabilidad**

El sistema integrado de buses y puntos de recarga debe operar con una confiabilidad similar a los buses diésel actuales.

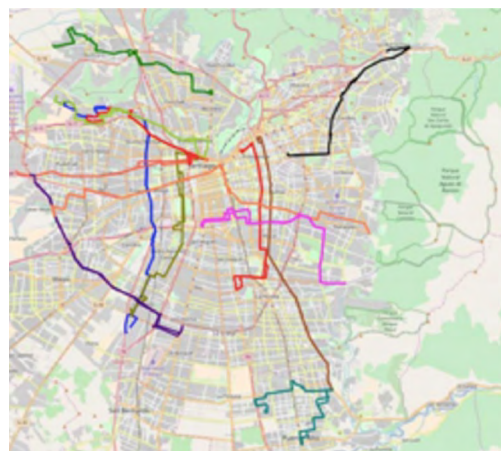
En este sentido se deben realizar análisis detallados ruta por ruta, bajo condiciones específicas, de tal forma que logre obtener información que permita seleccionar las rutas de mayor viabilidad para la operación de los buses eléctricos.

En el caso de Santiago, a través de datos recopilados en campo y de simulaciones se logró la identificación de 13 rutas, en las cuales se estimó el kilometraje, las vueltas máximas al día por carga, el nivel de frecuencia y el tiempo de recarga, para que fueran eficientes para ser operadas por buses eléctricos.

Figura 6

Análisis de Rutas a electrificar en Transantiago

UN 2018	Recorrido	Kilometraje hasta un 20% aprox. de batería	Vueltas	Minutos de carga	Baja frecuencia en terminal
1	121	197	5.5	0:02:55	✓
4	103	141	5	0:02:59	✓
	403	155	4.5	0:03:14	X
	D05	186	5.5	0:02:52	X
6	C05	153	5	0:02:49	X
7	104	215	5.5	0:03:05	X
	F10	183	6.5	0:02:30	X
	F13	172	5	0:03:00	X
	F14	211	7	0:02:24	✓
8	408	249	10.5	0:01:45	X
	B03	240	7.5	0:02:41	X
	B04	207	10.5	0:01:38	✓
	B06	251	7.5	0:02:25	✓
	B16	185	10.5	0:01:33	✓
	B27	150	6	0:02:17	✓
9	402	236	8	0:02:14	✓



Fuente: Análisis de rutas del transporte público potenciales a electrificar en Santiago de Chile, 2018. Centro Mario Molina Chile (CMM). Cooperación Técnica RG-T3078

Como conclusión de este ejercicio se pudo identificar que para el caso de Transantiago:

- Los servicios con mayor potencial son aquellos con recorridos más cortos y con frecuencias de buses por hora no muy altas,
- Están ubicados preferentemente en las zonas más planas de la ciudad (Poniente-Centro, Norte-Sur).
- Los buses con carga en depósito (en patios y generalmente en las noches)
- son muy recomendables en la mayoría de servicios, principalmente porque estos son recorridos más cortos y su autonomía les permitiría operar durante gran parte del día.
- En pocos casos sería viable utilizar carga de oportunidad (cargas rápidas y en puntos específicos durante la operación) porque existe el riesgo que suceda una falla grave de un cargador y esto detenga la operación, dado que en los puntos de carga de oportunidad por lo general sólo se instala uno por ruta.

2.2.2.

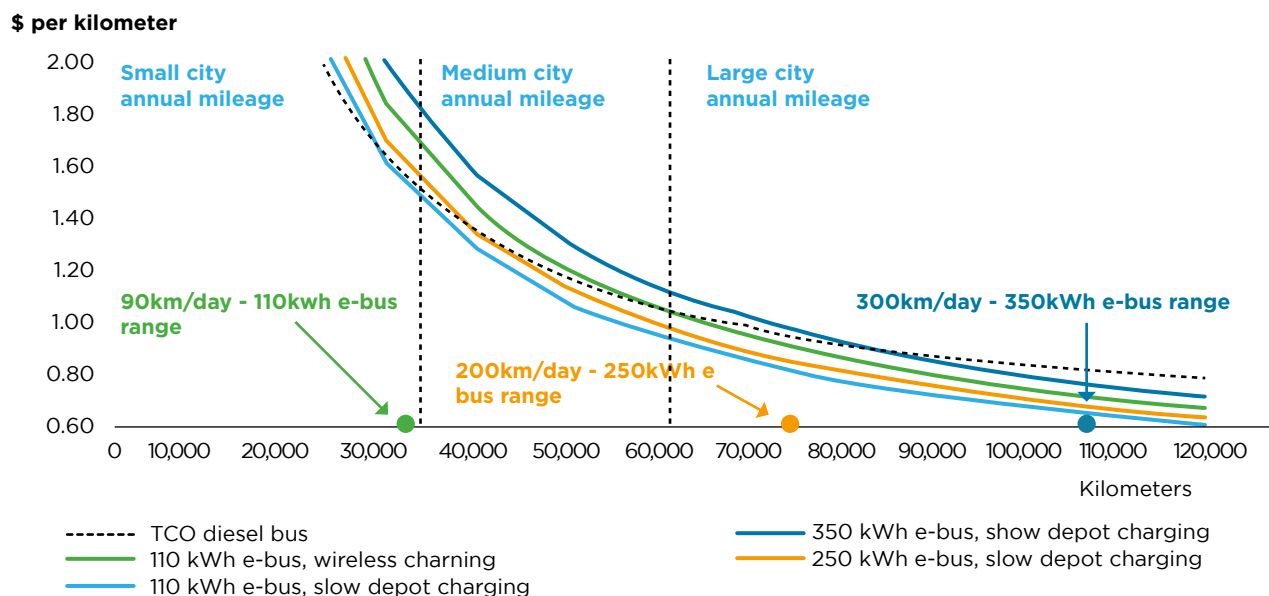
Impacto de las rutas largas

Uno de los factores determinantes para la elección del tamaño y capacidad de la batería en un bus eléctrico son los kilómetros por día recorridos. En ciudades grandes, donde la distancia diaria recorrida por un bus puede superar los 300 km, será necesario adoptar baterías grandes con alta capacidad, lo cual implica mayores costos de adquisición; mientras en ciudades medianas o pequeñas con

distancias de conducción promedio de alrededor de 160 km las necesidades serán mucho menores y por consiguiente el costo del conjunto bus – batería será mucho menor. La relación kilómetros recorridos – TCO es una herramienta eficiente para determinar el tipo de vehículo y batería a implementar, por lo cual es recomendable su análisis incluyendo también el escenario de utilización de buses diésel, como factor de comparación.

Tabla 7

TCO comparativo para buses eléctricos y diésel con diferentes kms anuales recorridos



Fuente: Bloomberg New Energy Finance. Notas: Precio del diésel \$ 0,66 / litro (\$ 2,5 / galón), precio de la electricidad a \$ 0,10 / kWh, kilómetros anuales recorridos: variable. La longitud de la ruta no siempre se corresponderá con el tamaño de la ciudad, esto dependerá del diseño operacional.

Este tipo de análisis, en donde algunas variables se mantienen fijas (vida útil, eficiencia por tipo de batería, costos operacionales, etc.), demuestran que a mayor distancia recorrida anualmente el TCO por kilómetro es más bajo para cualquier tipo de tecnología, sin embargo, existen puntos de cruce que evidencian escenarios en donde los buses eléctricos son mas rentables. En general, el TCO de todas las configuraciones de buses eléctricos mejora significativamente en relación con los buses diésel a medida que aumenta el número de kilómetros recorridos anualmente. Sin embargo, esto no quiere decir que el ideal sea definir rutas largas con muchos kilómetros por ruta, ya que se debe considerar las restricciones en autonomía consecuencia de la capacidad de batería disponible y el peso, esto sumado a la necesidad de tener un diseño operacional eficiente en función de la demanda que será atendida. Por lo anterior la clave de este proceso es tener un modelo de rutas eficiente que cubra la totalidad de viajes requeridos por sus usuarios, y sobre el cual se seleccionará la tipología de buses que permita cubrir el servicio con los menores costos de adquisición y de operación; en donde como se ha demostrado, la tecnología eléctrica puede llegar a ser muy competitiva.

2.2.3.

Otros apoyos asociados a la operación

Teniendo en cuenta la poca experiencia que existe en la región en el manejo de la tecnología eléctrica, el Banco ha financiado algunos estudios complementarios en las ciudades para lograr una puesta en marcha adecuada de sus sistemas. Dentro de estos, se destaca el caso de Medellín en donde aparte de la definición técnica

y financiera para la adquisición de los buses se realizó un acompañamiento en la entrega de la nueva flota, para así garantizar una operación exitosa.

Este apoyo se dividió en dos fases. Una inicial relacionada con el acompañamiento técnico a la supervisión y seguimiento al contrato de adquisición de 64 vehículos eléctricos a la firma BYD y la segunda enfocada en las pruebas de funcionamiento, autonomía y performance, que son esenciales para garantizar un adecuado desempeño de los vehículos. Específicamente se desarrollaron las siguientes pruebas:

Pruebas a cargadores

Consisten en una serie de evaluaciones sobre las estaciones de recarga para garantizar su correcto funcionamiento y su seguridad e integridad a la hora de conectarse y utilizarse.

- Pruebas de conexión para inspección visual de funcionalidades básicas.
- Pruebas de protocolo para medición de parámetros y funcionamiento.
- Pruebas de seguridad durante funcionamiento.
- Pruebas de tiempo de recarga

Pruebas estáticas a buses

Consisten la inspección visual de cada vehículo adquirido constatando que se hayan respetado las dimensiones, espacios y normativas locales. Durante el procedimiento se revisa la integridad del vehículo y funcionalidades básicas como la apertura y cierre de puertas, ventilación, luces y rúters.

Pruebas dinámicas a buses

- Consisten en una serie de eventos de manejo donde se evalúan distintos parámetros del bus, a saber:
 - Freno de estacionamiento, radio de giro, alineación
 - Tracción y frenado, ascenso y descenso – en vacío y con carga máxima
 - Operaciones de emergencia – En vacío y con carga máxima
 - Pruebas del sistema eléctrico y del sistema de seguridad
 - Autonomía
- Para el caso específico de Medellín, este acompañamiento permitió llegar a ciertas conclusiones que implicaron requerimientos adicionales al fabricante y analizar la posibilidad de modificación al contrato. Particularmente, se estableció que:
- Algunos buses presentaron fallas mecánicas y de manufactura, por lo cual fue necesario requerir al fabricante para su ajuste y garantía.
 - Los buses cumplieron con las dimensiones y características señaladas, así como con las pruebas dinámicas.
 - El consumo energético de los buses está en un rango entre los 1,12 y 1,32 kWh/km, lo cual está dentro de los parámetros definidos en el modelo operacional.
 - En las baterías es posible almacenar una energía nominal de hasta 348 kWh de manera segura, sin embargo, el proveedor había declarado en su propuesta técnica que la capacidad de la batería era de 365 kWh.
 - Los cargadores podrían sobrecargar las baterías afectando su vida útil, así como la presencia de altas temperaturas en este proceso.

3.

Activos: Buses e Infraestructura de Carga



3.1.

Buses

Las tecnologías de buses eléctricos son reconocidas principalmente por sus bajas emisiones de carbono. En términos técnicos respecto de los buses de combustión interna, tienen las siguientes diferencias:

- Tienen un mayor peso localizado debido a las baterías de tracción, por lo que la arquitectura del chasis y la carrocería son planificados para el correcto reparto de pesos sobre los ejes delantero y trasero.
- Están equipados con un sistema de freno regenerativo, que al desacelerar el motor devuelve energía al inversor para que éste la transforme y entregue en las condiciones que las baterías la requieren para el almacenamiento.
- Disponen de menos componentes de fricción debido a una tracción sobre el eje casi directa, por lo cual se requiere menos lubricante para su operación.
- Tienen menos filtros y requieren menor cantidad de refrigerantes para el funcionamiento, debido a la temperatura de trabajo.
- Tienen un mayor rendimiento energético, por lo cual los costos asociados al uso de combustible son mucho menores.

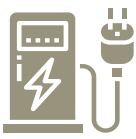


Operativamente, este tipo de buses son propulsados por motores eléctricos que responden a controladores que regulan su potencia. Existen tres tipologías dependiendo la forma en que se transmite o almacena la carga:

En la actualidad, dentro de la gama de vehículos eléctricos disponibles en el mercado, los más utilizados en los sistemas de transporte público son los Buses Eléctricos de Baterías (BEB) o buses eléctricos dependientes de batería, los cuales logran una mayor eficiencia (80% en términos de combustible) por su sistema de motor integrado al centro de la rueda, que confiere ahorros adicionales al eliminar la necesidad de transmisión diferencial y de partes mecánicas relacionadas. Dependiendo de la tecnología de carga elegida, se requerirán así mismo instalaciones de infraestructura de catenarias en las vías, o estaciones de recarga en los terminales, o una combinación entre carga rápida y largas sesiones de carga durante la noche o varias veces al día.

Según un análisis de mercado desarrollado por Transmilenio S.A. en el mundo existen aproximadamente 57 fabricantes de buses eléctricos, de los cuales se destacan por su representación en el mercado los de fabricación americana y europea como, Volvo, Solaris, ADL, Irizar, Optare y los de fabricación china como BYD, Fotón, Yutong, Zhongtong y Jinlong (Bloomberg New Energy Finance, 2018). A continuación, se presentan las tipologías más comunes ofertadas por los principales fabricantes, con algunas características específicas.

Tabla 8

Tipos de carga para buses eléctricos

Tipo	Características	Ventajas	Desventajas
<p>Conectables o Plug-in</p> 	<p>Utiliza baterías que necesitan ser cargadas con una fuente eléctrica y recargadas después de algunas horas y/o varias veces al día, ya sea por segundos (ultracapacitores, baja autonomía) o por minutos (baterías, de 30 a 300 km de autonomía).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Puede emplearse en ruta o en patios. • Utilizando tecnología de carga rápida aumenta la capacidad operativa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere una cuidadosa optimización de rutas. • Necesaria inversión en cargadores dependiendo la flota. • Se puede afectar la efectividad de la red de transporte, por la necesidad de cargas durante el día.
<p>Conductivos o por contacto</p> 	<p>La tecnología de tipo conductivo empleada para recargar buses eléctricos son los pantógrafos. Pueden ser conectados permanentemente a cables (catenarias) o por medio de recargas cortas de la batería para ampliar su rango o autonomía. En el segundo caso las cargas se realizan normalmente al principio o al final de la ruta y por medio de suministro eléctrico de alta potencia, que, en corto tiempo, entre 3 a 6 minutos, entregan suficiente energía para que el bus realice una o dos vueltas del recorrido.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se reduce el tamaño de la batería y el costo del bus. • Al disponer de cargador dentro de la ruta de operación se reducen los recorridos en vacío. 	<ul style="list-style-type: none"> • Si son conectados permanentemente la inversión en infraestructura es muy alta. • Si es con carga por oportunidad los cargadores son más costosos. • La infraestructura de carga se ubica en espacio público. • Alto costo del pantógrafo y adecuación del suministro eléctrico
<p>Inductivos</p> 	<p>Sistemas de carga ubicados bajo tierra y con conexión inalámbrica con bobinas especiales por debajo de los autobuses. Es una tecnología y con limitada disponibilidad comercial.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Menos vandalismo en infraestructura. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aún no se encuentra probada en una flota operativa. • Se generan pérdidas de energía en el proceso de recarga. • El sistema de recarga es costoso.

Fuente: Análisis y Diseño de Modelos de Negocio y Mecanismos de Financiación para Buses Eléctricos en Lima, Perú - Cooperación Técnica RG-T3078, BID. - Investments in Electric Buses for Public Fleets: Ten Questions for City Decision-Makers. World Resources Institute

En la actualidad, dentro de la gama de vehículos eléctricos disponibles en el mercado, los más utilizados en los sistemas de transporte público son los Buses Eléctricos de Baterías (BEB) o buses eléctricos dependientes de batería, los cuales logran una mayor eficiencia (80% en términos de combustible) por su sistema de motor integrado al centro de la rueda, que confiere ahorros adicionales al eliminar la necesidad de transmisión diferencial y de partes mecánicas relacionadas. Dependiendo de la tecnología de carga elegida, se requerirán así mismo instalaciones de infraestructura de catenarias en las vías, o estaciones de recarga en los terminales,

o una combinación entre carga rápida y largas sesiones de carga durante la noche o varias veces al día.

Según un análisis de mercado desarrollado por Transmilenio S.A. en el mundo existen aproximadamente 57 fabricantes de buses eléctricos, de los cuales se destacan por su representación en el mercado los de fabricación americana y europea como, Volvo, Solaris, ADL, Irizar, Optare y los de fabricación china como BYD, Fotón, Yutong, Zhongtong y Jinlong (Bloomberg New Energy Finance, 2018). A continuación, se presentan las tipologías más comunes ofertadas por los principales fabricantes, con algunas características específicas.

Tabla 9

Principales tipologías mercado buses eléctricos

Fabricante	Modelo	Longitud (m)	Capacidad Batería (kWh)	Km por carga (km)	Tecnología de Carga
Yutong	Yutong E12	12	295	320	Plug-in en patio, de 60kW a 150kW.
BYD	18MLE (articulado)	18	324	250	Pantógrafo y plug-in en un rango de 2x40kW.
	12m	12	324	320	Plug-in en patio con un rango de 2x40kW.
Zhongtong	LCK6122EVG	12	230	414	Plug-in en patio de 120kW.
Volvo	Volvo 7900 Electric	12	76	96	Carga de oportunidad o pantógrafo en poste.
Solaris	Urbino 8.9	8,9	160	200	Plug-in o pantógrafo de 80kW a 300kW.
	Urbino 12	12	240	266	Plug-in, pantógrafo o inducción de 80kW a 450 kW.
	Urbino 18 (articulado)	18	240	185	
ADL	Enviro 200EV	10,8 - 12	324	250	Plug-in en patio de 80kW.
	Enviro 400EV	10,3	61	30	Inducción por placas en el camino y plug-in en patio.
Irizar	Irizar I2e	12-18	376	250	Plug-in en patio de 80-100kW.
Optare	Solo EV	9-10	138	270	Plug-in en patio de 42kW.
	Metrocity EV	10,8	138	205	
	Versa EV	10-11	138	205	
VDL Bus & Coach	Citea LLE-99	9,9	180	N/A	Pantógrafo de 270kW.
	Citea SLF-120	12	63-240	N/A	Pantógrafo de 350kW.
	Citea SLF-180	18	63-180	N/A	Pantógrafo de 270kW.
Sunwin	Padrón 12m	12	200 - 362	240	Plug-in en patio de 80kW.

Fuente: *Electric Buses in Cities. Driving Towards Cleaner Air and Lower CO2.*

3.1.1.

Mercado de buses y tipologías en LAC

En LAC los competidores chinos son los que tienen mayor presencia, tanto por los buses puestos en funcionamiento, como por el mercadeo desarrollado para la promoción de estas tecnologías, en donde la firma BYD es la que tiene mayor participación con proyectos en Chile y Colombia principalmente.

La tipología más utilizada tanto en términos de implementación, como de procesos de estructuración y análisis de viabilidad, es el bus eléctrico padrón de baterías de 12m con el cual se vienen estructurando los Corredores Complementarios en Lima y los proyectos de buses eléctricos en Costa Rica. Esta tipología tiene la ventaja de adaptarse fácilmente a los requerimientos de demanda de los sistemas de transporte, al tener una buena capacidad (80 a 90 pasajeros) y dimensiones adecuadas tanto para la operación en vías principales como secundarias, debido a su radio de giro (12 a 13 metros).

En Colombia los casos más documentados de implementación y estructuración de flota eléctrica, son Medellín y Bogotá. En el primer caso se viene realizando la incorporación de 64 buses para el sistema BRT Metroplús, con las siguientes

características: vehículo padrón 100% eléctrico, de 12 metros (dimensiones referenciales), con capacidad de 90 pasajeros (capacidad referencial) y de cama o plataforma alta “dual” (puertas de ingreso por ambos lados), lo anterior teniendo en cuenta que el sistema en unos tramos funciona en tráfico mixto.

Para Bogotá, la propuesta de Transmilenio es migrar a una tecnología 100% eléctrica más que todo en las rutas alimentadoras y servicios zonales. En este sentido, se realizaron pruebas piloto desde 2015 con un bus eléctrico de marca BYD EBUS ANDINO de 12 metros, modelo 2015, el cual opera en la ruta zonal P7 Provenir-Pinares y de lo cual se ha podido concluir que el rendimiento del bus está un 10% por debajo (0,95km/kWh) del especificado por el fabricante.

A partir de los resultados obtenidos con este piloto y estudios desarrollados con el apoyo del Banco, en la actualidad TransMilenio ha adjudicado 1.485 buses eléctricos para el componente zonal y troncal. Dentro de los estudios desarrollados para estas licitaciones se han analizado las tipologías eléctricas existentes tipo padrón, junto con otras también eléctricas del tipo busetón de 9 metros y 50 pasajeros, y tipo buseta de 8 metros y 40 pasajeros.

Tabla 10

Costos Aprox. (US\$ entre 2019 - 2020) en LAC para bus padrón eléctrico de 12m (plug-in) por proveedor

Ciudad	Yutong	BYD	QEV-Tech	King Long	Zhongtong	Sunwin
Lima - Perú	\$ 322.200 Bat: 320 kwh	\$ 315.500 Bat: 240 kwh	\$ 287.000 Bat: 200 kwh			
Buenos Aires - Argentina	\$ 348.000 Bat: 324 kwh	\$ 292.000 Bat: 324 kwh		\$ 240.000 Bat: 143 kwh	\$ 340.000 Bat: 324 kwh	
Santiago - Chile	\$ 348.000 Bat: 324 kwh	\$ 347.500 Bat: 330 kwh				
San José - Costa Rica			\$ 287.000 Bat: 200 kwh			\$ 280.000 Bat: 300 kwh
Medellín - Colombia	\$ 400.000 Bat: 324 kwh	\$ 310.000 Bat: 330 kwh				\$ 370.000 Bat: 295 kwh
Bogotá - Colombia	\$ 400.000 Bat: 375 kwh	\$ 360.000 Bat: 330 kwh				\$ 354.130 Bat: 351 kwh

Fuente: BID a partir de consultorías de apoyo a la implementación de buses eléctricos en la región – Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

En términos de costos, los valores para la tipología padrón de 12m varía dependiendo del fabricante, de la capacidad de la batería y de las condiciones particulares de cada ciudad, por lo cual hacer comparaciones entre fabricantes puede ser complicado ya que no existe un estándar de vehículo,

sino que los mismos obedecen a las características operacionales de cada sistema. A pesar de esto, el rango de precios no es muy grande y el precio final dependerá de los parámetros de negociación que se logren y la forma de adquisición.

3.1.2.

Variables a tener en cuenta en la escogencia del tipo de vehículo

Adecuación Bus – Ruta

La elección del tipo de bus eléctrico y sus características es la sumatoria del análisis de una gran cantidad de parámetros técnicos y financieros. Como se ha descrito en capítulos anteriores, las condiciones operacionales juegan un papel importante para el dimensionamiento de las necesidades, en donde elementos particulares de los servicios como la longitud de las rutas, topografía, perfil de carga, frecuencias y tiempos valle (para una posible recarga diurna); junto con los respectivos costos de adquisición, operación y mantenimiento, son el conjunto de parámetros a tener en cuenta para definir algunas variables particulares del tipo de vehículo.

Para que estos procesos sean exitosos, el BID ha venido apoyando algunas ciudades en LAC para analizar sus condiciones operacionales y de esta forma escoger la flota eléctrica que mejor se ajusta a sus necesidades. Con el apoyo de WRI, por ejemplo, se realizaron estudios específicos para Medellín y Ciudad de Guatemala, en donde se analizaron los diseños operativos vigentes, se revisaron las posibles rutas a implementar, se realizó una estimación de flota requerida y se definieron los parámetros técnicos y tecnológicos para la inclusión de flota eléctrica.

Otros apoyos, se han enfocado específicamente en el análisis detallado de rutas potenciales a electrificar, basados en principios de productividad, operación eficiente y confiabilidad, como son los casos desarrollados en Santiago y Costa Rica. Estos análisis tienen por objetivo identificar aquellas condiciones que sean mas favorables en términos del tipo de recarga, comportamiento durante los recorridos, costos de operación y posibles fallas que se puedan presentar; lo anterior obteniendo como resultado parámetros operacionales como el consumo energético, los tiempos de ciclo y el rendimiento.

Rendimiento (km/kWh)

Una de las variables de mayor importancia y que a la vez genera bastante incertidumbre es el rendimiento, el cual será representado por la cantidad de kilómetros recorridos por unidad de energía (km/kWh). Es conocido que los buses eléctricos pueden ser más sensibles a las condiciones de operación que un bus a diésel¹⁶, por lo cual determinar el rendimiento para una ciudad específica, basado en datos internacionales puede ser una estimación riesgosa. Así mismo, algunas experiencias han demostrado que los datos proporcionados por los fabricantes tienen también un grado de variabilidad con la realidad, por lo cual, a pesar de ser la fuente principal para los cálculos teóricos, es importante reforzar estos análisis con datos experimentales.

¹⁶ BASE, 2019. Costos y tarifas de remuneración por vehículo y por kilómetro, para vehículos eléctricos de la flota Troncal y No troncal de la Fase III del Sistema Integrado de Transporte Público SITP.

Tabla 11
Tabla 11 Rendimientos buses eléctricos experiencias en LAC.

Ciudad	Rendimiento	Fuente de Información	King Long
Lima	0,78km/kWh	Piloto	Bus administrado por ENGIE. Operación con aire acondicionado.
	1,09 km/kWh	Fabricantes	
Montevideo	0,78km/kWh	Piloto	Realizado en 2013 por el Ministerio de Energía y Minas (MIEMDNE, 2013).
Bogotá	0,95km/kWh	Piloto	Bus Zonal BYD EBUS ANDINO, sin aire acondicionado.
	1,20km/kWh	Fabricantes	Promedio Fabricantes BYD, SUNWIN, YUTONG, Zhongtong.
Medellín	1,03km/kWh	Fabricantes	Promedio Fabricantes BYD, SUNWIN, YUTONG, Zhongtong Foton.
Santiago	0,89km/kWh	Operación	Operación Metbus con aire acondicionado y sin aire acondicionado.
	1,00km/kWh		
Buenos Aires	1,07km/kWh	Piloto	Bus Yutong, sin aire acondicionado.

Fuente: BID a partir de consultorías de apoyo a la implementación de buses eléctricos en la región – Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

Adicional a la variación en términos de lo registrado por los fabricantes y los pilotos desarrollados, que en promedio puede llegar a ser del 25%, se ha logrado evidenciar que la tecnología ha incrementado su rendimiento a medida que los fabricantes han logrado reducir el peso de los vehículos tanto en el chasis como la batería. De esta manera emplear información sobre rendimientos de proyectos ejecutados hace más de uno o dos años podría no ser representativo. Para tener información actualizada, una alternativa económica y con buenos resultados es la realización de pruebas piloto.

Costo de Adquisición

La otra variable y tal vez la más determinante a la hora de analizar la posibilidad de implementar flota eléctrica es el costo de adquisición del vehículo. Cuando se realiza un estudio económico hay gran cantidad de factores que impactan el precio final de este activo, y que deben ser tenidos en cuenta para un adecuado análisis de sensibilidad:

Tabla 12

Factores asociados al costo final de los buses eléctricos.

Costos que dependen del país	Costos que dependen del fabricante
<ul style="list-style-type: none"> • Carga tributaria del país. • Beneficios y exenciones aplicables de acuerdo con la normatividad local. • Gastos de matrícula y seguros para su rodamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costos de transporte e importación dependiendo del lugar de fabricación. • Costos específicos de cada uno de los componentes del vehículo (chasis, la carrocería, las baterías, etc.). • Costos asociados a la adecuación de los vehículos en el lugar de operación. • Costos asociados al proyecto y la cantidad de buses requerida por la ciudad

Fuente: BID a partir de consultorías de apoyo a la implementación de buses eléctricos en la región – Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

Si bien el costo final de la adquisición de buses eléctricos ha venido disminuyendo con el tiempo a medida que la tecnología evoluciona, hoy en día se tienen rangos de precios en la región que pueden tener

cierto margen de variabilidad dependiendo del proveedor, el país y las economías de escala que se puedan llegar a tener por el volumen de la flota.

Tabla 13

Costos promedios en LAC para bus padrón eléctrico de 12m.

Ciudad	Costos promedio US\$*	Fuente información	Proveedores
Lima - Perú	287 mil – 332 mil	Cotización proveedor	Yutong, BYD y QEV-Tech
Buenos Aires – Argentina	290 mil – 374 mil	Cotización proveedor	Yutong, King Long y Zhongtong
Santiago - Chile	292 mil	Costo adquisición	BYD
San José – Costa Rica	280 mil – 355 mil	Cotización proveedores	Yutong, BYD, QEV-Tech y Sunwin
Medellín – Colombia	310 mil	Costo adquisición	BYD
Bogotá - Colombia	335 mil **	Cotización proveedores	BYD, Sunwin, Yutong y Zhongtong

* Costos de referencia para los años 2019 y 2020.

**Para Bogotá se han analizado también tipologías busetón (US\$240 mil) y buseta (US\$185 mil).

Fuente: BID a partir de consultorías de apoyo a la implementación de buses eléctricos en la región – Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

El caso de Santiago permite tener información bastante relevante dado el nivel de avance en la implementación, en donde los buses adquiridos recientemente (2019) en su mayoría al fabricante BYD, tuvieron un valor promedio de US\$292 mil, destacando que el costo del mismo vehículo hace 5 años (2014) era de aproximadamente US\$450 mil, lo que representa una disminución del 35% en 5 años, razón por la cual los análisis deben desarrollarse con la información más reciente posible dada la variabilidad de precios en el tiempo.

Comparando la oferta de buses eléctricos en los países de la región se encuentra, sin considerar impuestos, que los costos promedio son relativamente similares con variaciones en el valor promedio entre el 5% y 10%. En el precio de los vehículos es determinante conocer la capacidad de

la batería, dado que a mayor capacidad mayor es el costo de la misma y por consiguiente del bus en su conjunto.

Garantías ofrecidas por los Fabricantes

Otro factor a tener en cuenta son las garantías que ofrecen los fabricantes, dada la incertidumbre y falta de conocimiento que existe en la utilización de la tecnología. Esto permite un mayor grado de confiabilidad en el momento de la adquisición, debido a que el operador puede contar con el apoyo del fabricante durante el tiempo de operación, lo cual puede estar condicionado a la suscripción de contratos de mantenimiento. Estas garantías por lo general se dan por separado para los componentes del bus y tiene condiciones particulares para cada una de ellas.

Tabla 14
Garantías ofrecidas (años)

Parte del Bus	Vida Útil	Garantía	Garantía Extendida
Carrocería	15	15	No se ofrece
Chasis	15	15	No se ofrece
Kit Eléctrico*	15	15	Hasta 10 años
Batería	10	10	Hasta 15 años
Cargador	15	15	Hasta 15 años

**Incluye: Controlador, Inversor, Motor eléctrico, Transmisión y Reductor.
Fuente: BID a partir de consultorías de apoyo a la implementación de buses eléctricos en la región - Cooperación Técnica RG-T3078, BID.*

Homologación de vehículos

Para cada país en específico, se deberán analizar las condiciones y requerimientos que el fabricante debe presentar para realizar la homologación de los vehículos. Esta homologación comúnmente se refiere a la seguridad del motor eléctrico y de los usuarios. En Costa Rica, se propuso el reglamento 100 de la Comisión Económica de la Naciones Unidas para Europa, donde se detallan los requerimientos y métodos de prueba. Otras certificaciones reconocidas a nivel internacional para vehículos eléctricos son el estándar chino GB/T 18384-2015, el estándar internacional ISO 6469 y la Regulación técnica global No. 20.

Por ejemplo, Para que un fabricante cumpla con el reglamento 100 de la Comisión Económica de la Naciones Unidas para Europa, deberá presentar un vehículo representativo al servicio técnico responsable de la homologación para realizar los siguientes ensayos:

- Protección contra choques eléctricos: Se pone a prueba la protección de las partes activas dentro y fuera del habitáculo para ocupantes y la resistencia de aislamiento entre las partes del bus de alta tensión y el chasis eléctrico.
- Seguridad del sistema de acumulación de energía: Se realizan pruebas de vibración, de choque térmico y de ciclos, de impacto mecánico, de resistencia al fuego, de protección contra cortocircuitos, de protección de sobrecarga y descarga excesiva y protección contra sobrecalentamiento.
- Seguridad funcional: Mediante la prueba se deberán demostrar los mecanismo de alerta cuando el conductor se retira de su asiento y el vehículo continúa en modo conducción y además valida

el mecanismo que imposibilita que el vehículo se desplace durante el proceso de carga.

Dependiendo del contexto normativo en cada país, y los estándares adoptados, los fabricantes deberán surtir los procesos de homologación garantizando ante todo la seguridad de los usuarios.

3.2. Baterías

La batería es sin lugar a duda el componente clave de los buses eléctricos que manejan este tipo de tecnología para el almacenamiento de energía requerido para su desplazamiento. De ella dependen algunas características importantes del vehículo como su peso, autonomía, costo y vida útil; por lo cual su dimensionamiento, capacidad y vida útil, son aspectos de total relevancia en la implementación de flota eléctrica por varios condicionantes:

- Dependiendo de los kilómetros a recorrer y características de las rutas se establecen la necesidad de energía y por consiguiente la capacidad de la batería, junto con su posible recarga durante el día.
- Las baterías tienen una densidad específica entre 140 y 180 Wh/kg, que dependiendo de la capacidad requerida puede llegar a aumentar el peso del bus en aproximadamente 1.5 toneladas.
- La vida útil de las baterías está dada por los ciclos de recarga, los cuales están entre los 3.000 y 4.000, que pueden

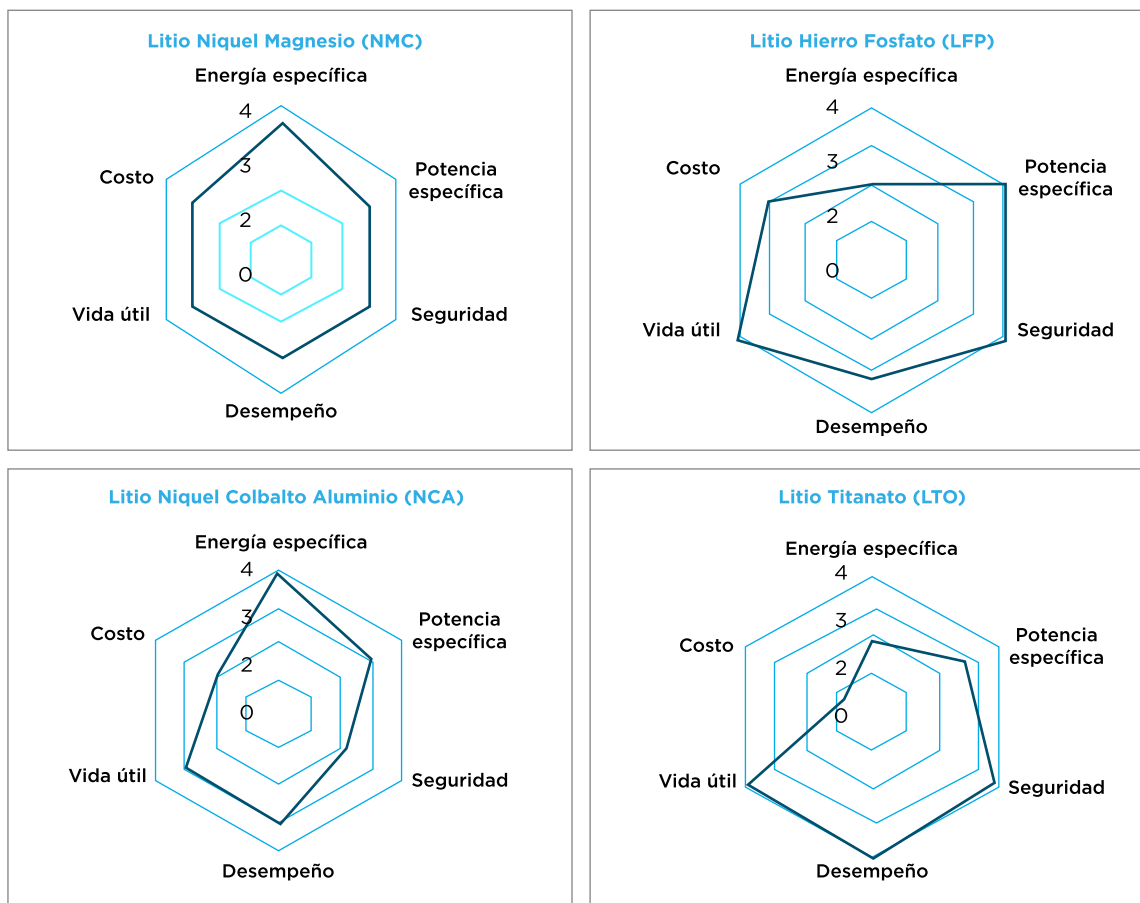
llegar a alcanzarse entre los 10 a 12 años. A estos aspectos hay que sumarle la recomendación de los fabricantes de un margen de seguridad de entre el 10% y 20% a la hora de definir la capacidad requerida.

- Es importante adoptar estrategias de carga que prolonguen la vida útil de las baterías y sistemas de monitoreo que puedan advertir sobre posibles fallas y éstas se puedan atender y así extender la vida útil y mejorar el retorno de inversión del vehículo.

Las baterías de tracción están compuestas de celdas agrupadas en módulos de batería, vinculadas en serie o paralelo en función del voltaje y amperaje, y son controladas por un BMS (Battery Management System) que monitorea constantemente todas las celdas, tanto en el período de recarga como en el período de operación. Las baterías de mayor uso en el transporte eléctrico pesado son las de Litio Hierro Fosfato (LFP) debido a la potencia específica y su vida útil, que permite dar unos mayores niveles de seguridad y rendimiento para la operación¹⁷. La siguiente figura muestra los tipos de baterías usadas para el transporte público.

Figura 8

Tipos de baterías para el transporte público.



Fuente: Buchmann, 2019.

¹⁷ Análisis y Diseño de Modelos de Negocio y Mecanismos de Financiación para Buses Eléctricos en Lima, Perú. – Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

En el mercado existen baterías de diferentes capacidades, entre 127kWh y 375kWh principalmente, y es en este rango en el cual se identifica cual es la que mejor se adecua a las necesidades operacionales, en donde la posibilidad de hacer una recarga durante el tiempo de operación diaria, es un factor determinante para su dimensionamiento. En términos de costo, los mismos están dados igualmente por su

capacidad (\$US/kWh), por lo cual el costo final dependerá de esta variable y del fabricante; aunque muchos no desglosan el costo de la batería. A continuación, se presentan algunos valores de referencia obtenidos a partir de los estudios desarrollados con apoyo del BID para la implementación de flota eléctrica en los sistemas de transporte de LAC.

Tabla 16
Características baterías – Experiencias en LAC

Ciudad	Capacidad (kWh)	Costo (\$US/kWh)
Lima - Perú	Yutong: 320 BYD: 240 QEV-Tech: 200	460 (promedio)
Buenos Aires – Argentina	Yutong: 324 Higer Bus Company: 127 King Long: 314 - 143 Zhongtong: 324	350 (promedio)
Santiago - Chile	324	--
San José – Costa Rica	Yutong: 324 BYD: 330 Sunwin: 295 QEV-Tech: 300	Yutong: 350 BYD: 332 Sunwin: 320 QEV-Tech: 359
Medellín – Colombia	Yutong: 374 BYD: 330 Sunwin: 362 Zhongtong: 314 Foton: 303	--
Bogotá - Colombia	Yutong: 375 BYD: 330 Sunwin: 351 Zhongtong: 364	Yutong: -- BYD: 332 Sunwin: 367 Zhongtong: 375

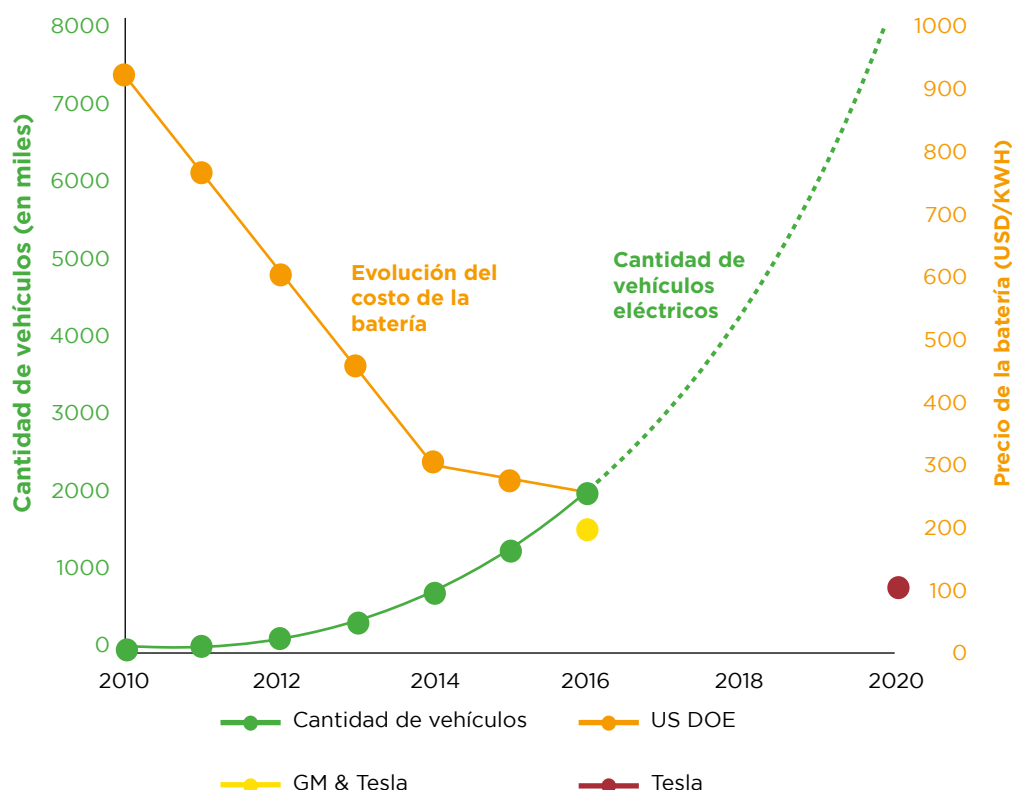
Fuente: BID a partir de consultorías de apoyo a la implementación de buses eléctricos en la región – Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

Según la experiencia, el costo de la batería puede llegar a representar entre el 35% y el 45% del valor total del bus, sin incluir cargadores¹⁸, sin embargo, los fabricantes son reacios a proporcionar y ofrecer de manera independiente los costos de las baterías por su rápida evolución. Según la Agencia Internacional de Energía (2017), el costo promedio de fabricación de baterías cayó de estar por encima de 900 USD/

kWh en el 2010 a aproximadamente 300 USD/kWh para el 2014. A partir de esa fecha el precio de las baterías se ha venido reduciendo en aproximadamente 9% anual, para alcanzar un precio de 200 USD/kWh en el 2019. Si bien la sensibilidad en el costo de las baterías ha generado incertidumbre en el valor real del bus, también la caída en su precio ha sido responsable de la cantidad de vehículos implementados.

Tabla 9

Efecto de la reducción del costo de la batería en el Mercado de VE



Fuente: Agencia Internacional de Energía, 2017.

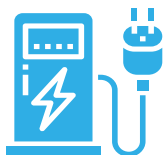
¹⁸ Análisis y Diseño de Modelos de Negocio y Mecanismos de Financiación para Buses Eléctricos en Lima, Perú. BID, Ministerio de Energía y Minas de Perú y BASE, 2020.

Un factor a tener en cuenta con las baterías es qué hacer con ellas una vez cumplen su vida útil. Los fabricantes inicialmente habían planeado su reciclaje, sin embargo, están descubriendo que las baterías pueden llegar a tener suficiente capacidad para ser utilizadas para aplicaciones de segunda vida, principalmente para proyectos de almacenamiento estacionario o generación de energía para zonas comunes de edificios o estacionamientos. Por ejemplo, Renault anunció recientemente que instalaría baterías EV usadas en la isla portuguesa de Madeira; mientras China Tower, propietaria y operadora de aproximadamente dos millones de torres de telecomunicaciones, firmó un acuerdo con 16 compañías involucradas en la cadena de suministro de baterías para usar las usadas en el reemplazo de aquellas de plomo-ácido existentes, que proporcionan energía de respaldo a las torres. Suponiendo que se

requiere una batería de 10kWh para cada torre, reemplazar todas las baterías de plomo-ácido existentes de China Tower con baterías EV usadas representa un mercado de 20GWh. Estos proyectos ayudarán a desarrollar la comprensión del potencial para el uso de baterías usadas, abriendo una posibilidad económicamente que podría ayudar a aumentar los valores residuales de los buses eléctricos.

3.3. Cargadores

Otro elemento que incide tanto en la operación como en el costo del vehículo son los cargadores. Actualmente, existe uno específico de acuerdo con el tipo carga que tienen los buses:



Conectable

Es el mas sencillo y de bajo costo, que por lo general se instala en los patios y permite la carga de la batería en un lapso de entre 1 y 6 horas dependiendo de la potencia del cargador, en donde los más empleados son los de 80 a 120 kW, aunque existen algunos de hasta 300kW.



Conductivo

Utiliza pantógrafos ubicados en zonas específicas del trayecto con el ánimo de generar cargas cortas y de alta potencia entre 300kW y 500 kW, con la desventaja de requerir grandes inversiones para esta infraestructura.



Inductivo

Apenas en etapa exploratoria, en donde el bus se detiene en una estación para que el sistema de carga, sin necesidad de ningún tipo de conexión, recargue la batería.

Figura 9

Tipos de cargadores para buses eléctricos

Conectable



Inductivo



Conductivo

En los proyectos de buses eléctricos se ha usado casi que en su totalidad el sistema conectable, en donde el dimensionamiento de la cantidad de puntos y necesidades de carga (lenta o rápida) se determinan a partir de las condiciones operacionales y magnitud de la flota. Este análisis parte de un modelo de consumo eléctrico en el cual se definen las necesidades de carga a partir de la flota existente, asignando cargadores de acuerdo con su potencia y la posibilidad del uso simultáneo de estos en determinadas horas del día. Lo que se busca es la realización de una programación bus a bus, que permita distribuir de forma razonable –por consumo eléctrico– la operación de los cargadores de uso simultáneo.

Los costos de estos elementos están directamente ligados con la potencia de cada uno, por lo cual en la región se tiene rangos entre los US\$30mil para los de 80kW, US\$35mil para los de 120kW y hasta \$US50mil para los de 300kW. Sin embargo, en este análisis se destaca el caso de BYD que ofrece un cargador de 80kW en US\$6.500, debido a que cuenta con buses que convierten la corriente alterna a corriente continua en su interior y no en el cargador.

En varios proyectos como el de Medellín y Santiago se han logrado alianzas importantes con los proveedores de energía (EPM y ENEL, respectivamente) para que asuman el costo de estos

elementos y tengan a cargo su instalación, mantenimiento y conservación. Esto permite que la infraestructura se pague dentro de los costos de la energía y se transfieran algunos riesgos que no son propios de la operación de buses.

Finalmente, otro parámetro a considerar a la hora de la instalación de los cargadores es la diversidad en los protocolos de conexión. De la misma forma que los tomacorrientes comunes requirieron de un marco normativo para su estandarización, el sistema de recarga de vehículos eléctricos también requiere de estandarización para que tanto las tomas como los conectores sean compatibles. En la actualidad existen tres tipos de estándares de recarga: el GB/T empleado por los fabricantes chinos, el CHAdeMO empleado por los japoneses y el CCS, también llamado Combo, empleado en Europa y Estados Unidos. El punto clave en este aspecto, es que en los procesos de adquisición o licitaciones se incluyan no solo las especificaciones de los vehículos, sino también las características de recarga para facilitar la estandarización, ya que estos estándares también regulan la comunicación entre el vehículo y el cargador y pueden facilitar o impedir el uso de software de carga inteligente de terceros, además el fabricante puede proveer el bus con determinado estándar, pero al solicitarlo puede variar el precio dependiendo en el tamaño de la flota adquirida.

3.4.

Patios y Talleres

Los Patios y Talleres de buses son infraestructuras diseñadas para albergar los buses y otros equipos, y que funcionan también como instalaciones de reparación y almacenamiento. En el caso de los buses eléctricos es donde se recargan durante la noche y se reemplazan las baterías, teniendo características particulares por el tipo de tecnología y las condiciones operaciones.

- Requieren por lo general mayor espacio para la instalación de los cargadores, debido a que estos pueden atender un número limitado de buses. Por ejemplo, en Ciudad del Cabo se estimó que el espacio adicional requerido era de un 30%, comparado con un patio para buses diésel.
- En algunas ciudades, como Santiago, para optimizar la ocupación de espacio de los cargadores, se construyeron andamios para tenerlos en altura y así tener más espacio para buses.

- Por la mayor demanda eléctrica requerida para cargar la flota, se requiere de mejoras en la infraestructura de distribución eléctrica, convirtiéndose en uno de los aspectos más relevantes de la inversión.
- Deben incluir un almacén de baterías con suficiente espacio para guardar aquellas que son cambiadas y las de reserva.
- Debido a que los buses eléctricos no tienen los mismos requisitos de ventilación que los diésel o GNC, es posible construirlos de forma subterránea es más viable. Por ejemplo, en París se está siguiendo este enfoque lo cual reduce la cantidad de bienes inmuebles en superficie a adquirir, que en ciudades densas son escasos.

Dependiendo del esquema de negocio esta infraestructura puede ser construida por las autoridades locales, las empresas de energía o los operadores de transporte, sin embargo, la operación si es exclusiva de estos últimos.

Figura 10

Patios y Talleres Buses Eléctricos





3.5. **Almacén de Baterías**

Estas instalaciones son donde se alojan las baterías recargadas y se intercambiará con aquellas agotadas. Por lo general, se recomiendan que estén lo más cercano posible a la zona de Talleres para evitar movimientos largos de las baterías que suelen ser de tamaños y pesos considerables; por lo cual en algunas ocasiones estas áreas son dotadas con sistemas robóticos que pueden ser utilizados para facilitar el proceso, lo que requerirá de una infraestructura adecuada e inversión adicional. Aunque actualmente en la región en ningún país se incluye este método para el reemplazo de baterías, es importante mencionarlo en este documento como una opción para futuras estructuraciones o modernizaciones de sistemas de buses eléctricos en LAC.

3.6. **Redes eléctricas**

El suministro de energía eléctrica es un activo importante a tener en cuenta para la estructuración de un proyecto de buses eléctricos. Además de analizar la fuente, el proveedor y las tarifas, se deben definir los mecanismos necesarios para adaptar o llevar esta energía hasta los patios o los sitios de recarga que sean definidos en la infraestructura y operación.

4.

Condiciones Habilitantes



Por condiciones habilitantes se entienden todas aquellas herramientas que permiten dar sustento y garantías adecuadas para el desarrollo de un proyecto específico y que se deben tener en cuenta cuando se ha tomado la decisión de estructurar un proyecto de buses eléctricos; en este caso particular, las condiciones habilitantes son fundamentales para dar forma a las inversiones y se utilizan para señalar compromisos y objetivos políticos.

Las pautas oficiales ayudan a dirigir las actividades hacia un objetivo común, y los reglamentos y requisitos imponen responsabilidades a las entidades públicas o privadas¹⁹. Estos requisitos pueden encontrarse en documentos de marcos estratégicos, marcos legales, marco fiscal, entre otros.

4.1.

Marcos estratégicos

Los marcos estratégicos son importantes para el éxito de los modelos de negocio para buses eléctricos ya que, junto con los marcos fiscales de cada país y las leyes relacionadas, dan certeza y estabilidad para el desarrollo de las inversiones; además garantizan que sus promotores puedan acceder más fácilmente a financiamiento, ya que los Bancos perciben un menor riesgo cuando hay objetivos comunes entre las partes. Lo anterior se traduce en condiciones jurídicas adecuadas para la suscripción de contratos de largo plazo, en donde una normatividad estable y clara en

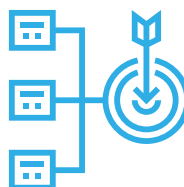
términos financieros y tecnológicos, es la base para generar confianza.

Estos marcos pueden materializarse a través de los siguientes instrumentos, los cuales tienen diferentes escalas de prevalencia y detalle:



Estrategia Nacional

Es un conjunto de medidas que los gobiernos formulan y aplican para fomentar y facilitar la creación, desarrollo, gestión y protección de iniciativas de manera efectiva en el ámbito nacional²⁰. En ésta se identifican las posibles barreras y se establecen objetivos, definiendo metas y resultados claros.



Planes

Están orientados a la materialización de los objetivos, a través de la generación y articulación de políticas y proyectos de corto y largo plazo, que logren superar obstáculos específicos como los cambios de gobierno y la falta de fuentes de financiación.

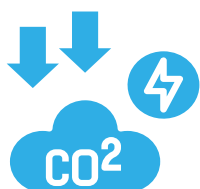
¹⁹ Financing Electric and Hybrid-Electric Buses: 10 Questions City Decision-Makers Should Ask. WRI.

²⁰ CEPAL, 2011.

²¹ UNDP, 2015.

²² Graglia, J. Emilio (2012). En la búsqueda del bien común. Manual de políticas públicas.

²³ Kilpatrick, Dean, (2010). Definitions of Public Policy and Law.



NAMA

Acción de Mitigación Nacionalmente Apropriada (NAMA por sus siglas en inglés). Son un conjunto de actividades factibles definidas de manera soberana por un país y que conducen a la reducción de emisiones, las cuales deben ser medibles, reportables y verificables²¹.



Políticas

Son las actividades que un Estado diseña y gestiona a través de un gobierno y una administración pública con fines de satisfacer las necesidades de una sociedad²². También se puede entender como las medidas regulatorias, leyes, y prioridades de gasto sobre un tema, promulgadas por una entidad gubernamental²³.

Dentro del sector transporte los países han enfocado sus esfuerzos en la definición de marcos estratégicos relacionadas con la acción climática, la movilidad urbana y la transformación energética, entre otros; por lo cual los proyectos de buses eléctricos se convierten en un mecanismo adecuado para la materialización de estos objetivos, que a su vez permiten garantizar su ejecución bajo la sombra de una iniciativa común de carácter nacional o regional.

Por lo anterior, es ideal enmarcar los objetivos de los proyectos de buses eléctricos dentro de aquellos definidos de manera general por cada país, para así lograr articular esfuerzos entre varias instancias de gobierno; lo cual permitirá tener una dirección clara, asignación adecuada de responsabilidades y mayor certeza frente a los tiempos de implementación. En LAC los países que han venido desarrollando y

estructurando proyectos de electrificación en el transporte, han trascendido un paso previo mediante la definición de algún tipo de plan estratégico o simplemente mediante la adopción de directrices o iniciativas que permiten el fortalecimiento de estos proyectos, lo cual impulsa la adopción de esta tecnología dentro del transporte público de manera directa o indirecta.

Tabla 17

Planes, programas o iniciativas que enmarcan la implementación de buses eléctricos en la región.

País	Planes Estratégicos o Iniciativas
Perú	<ul style="list-style-type: none"> Acciones Nacionales Apropriadas de Mitigación (NAMA por su sigla en inglés) en los sectores de generación de energía y su uso final en el Perú (2015), que incluye la promoción de la energía eléctrica en el transporte. Política Energética Nacional 2010 – 2040, que tiene entre sus objetivos impulsar la mayor eficiencia en el uso de la energía y el desarrollo de un sector energético con mínimo impacto ambiental y bajas emisiones de carbono.
Colombia	<ul style="list-style-type: none"> Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica (2019), que tiene como objetivo definir las acciones que permitan acelerar la transición hacia la movilidad eléctrica, teniendo como meta la incorporación de seiscientos mil vehículos eléctricos a 2030. Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2018 – 2022, «Pacto por Colombia, pacto por la equidad» que identifica la necesidad de aumentar el ingreso de vehículos limpios a través de la formulación e implementación de una estrategia que fomente el transporte sostenible en los modos de transporte terrestre, fluvial y férreo, así como el fomento a la movilidad urbana sostenible. CONPES 3934 «Política de crecimiento verde», el cual establece como una de sus metas la incorporación de seiscientos mil vehículos eléctricos al año 2030. Plan Integral de Gestión de Cambio Climático (PIGCC) del Sector Minero Energético, el cual define, como parte de sus líneas estratégicas, impulsar los medios de transporte alternativos para reducir el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de GEI.
Costa Rica	<ul style="list-style-type: none"> El Plan Nacional de Transporte Eléctrico (PNTE) 2018-2030, tiene un horizonte de planificación de doce años y describe las acciones para fortalecer y promocionar el transporte eléctrico en Costa Rica, según lo establece la Ley No. 9518, “Ley de incentivos y promoción para el transporte eléctrico”. Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050, el cual tiene como uno de sus ejes la transformación de la flota de vehículos ligeros a cero emisiones, nutrido de energía renovable, no de origen fósil
Argentina	<ul style="list-style-type: none"> Plan de Movilidad Limpia en el ámbito de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, el cual promueve la movilidad eléctrica, incluyendo la realización de pruebas pilotos de buses eléctricos en la ciudad. Plan Estratégico Nacional de Movilidad Sustentable (en construcción), que establecerá metas de recambio y modernización de la flota vehicular y declarará de interés nacional la política de reducción de emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero derivados del transporte automotor terrestre.

Fuente: BID.

6.2.

Marcos legales: leyes, normas y regulación

El siguiente paso para lograr unas condiciones adecuadas para el desarrollo de proyectos de buses eléctricos es la materialización de los metas y objetivos establecidos en los marcos estratégicos, lo cual se logra con la correcta definición de leyes, normas, regulaciones, y requisitos habilitantes, que se configura en el marco legal que da forma a la introducción de esta tecnología en las ciudades. En este sentido, existen instrumentos que de forma directa o indirecta tienen relevancia en el modelo de negocio viable para la movilidad eléctrica y que se pueden agrupar, según el impacto que generan en los siguientes aspectos:

- **Promoción**, cuando son normativas que impulsan el desarrollo de los proyectos y buscan generar un ambiente jurídico adecuado para diseñar y estructurar nuevos proyectos e iniciativas.

- **Financiación**, cuando están enfocados en mejorar la rentabilidad económica y/o viabilidad financiera de los proyectos, por ejemplo, a través de alivios tributarios o exenciones.
- **Tecnología**, cuando están relacionadas con el uso, seguridad y funcionamiento de los activos del proyecto, en este caso los buses, baterías o infraestructura; más que todo encaminadas a la definición de especificaciones mínimas.
- **Operación**, cuando tienen impacto en algunos de los componentes asociados con la operación y el día a día del sistema, y que de alguna forma pueden ser el diferencial para lograr la estabilidad económica y funcional del mismo.

En LAC se han identificado y desarrollado normativas entorno a la posibilidad de adoptar buses eléctricos, cada una de ellas adaptada a las necesidades de cada país, sin embargo, existen vacíos que será necesario cubrir para lograr el éxito en cada implementación.

Tabla 17

Principales normas existente en la Región relacionadas con la implementación de buses eléctricos

País	Promoción	Fuentes de Recursos	Tecnología	Operación
Perú	Resolución Ministerial No. 250-2019-MINEM a través del cual se establecen Disposiciones para facilitar el desarrollo del mercado de vehículos eléctricos e híbridos y su infraestructura de Abastecimiento.	Decreto Supremo 95-2018-EF según el cual los vehículos nuevos eléctricos están exonerados de los siguientes gravámenes: Ad/Valorem, Impuesto Selectivo al consumo y Sobretasa Tributo.	Resolución Ministerial No. 37-2006-MEM. Código Nacional de Electricidad. Se incluyen algunas disposiciones generales sobre Equipos Cargadores de Baterías y Carga de Vehículos Eléctricos.	Decreto Supremo 0.36-2004-EF según el cual el servicio de transporte se encuentra exonerado del Impuesto General a las Ventas (IGV). Decreto Supremo 022-2009-EM, según el cual los usuarios libres (demanda anual mayor a 200kW) pueden negociar la energía directamente con la generadora y obtener mejores tarifas.
Colombia	Ley 1964 de 2019 por medio de la cual se promueve el uso de vehículos eléctricos en Colombia y se dictan otras disposiciones. Incluye promoción y metas para el transporte público. Decreto Distrital (Bogotá) 477 de 2013 con el cual se adoptó el plan de ascenso tecnológico del Sistema Integrado de Transporte Público como instrumento de gestión ambiental para la sustitución progresiva de tecnologías tradicionales, por tecnologías de cero o baja emisión.	Ley 1715 de 2014, que regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional: Incluye beneficios: exclusión de IVA, exención de aranceles y deducción de renta al 50%. Resolución 463 de 2018 de la que unifica los procedimientos para acceder a beneficios tributarios, en proyectos de uso de electricidad en el transporte público. Decreto 1116 de 2017 expedido por el MinComercio que permite la importación de vehículos eléctricos e híbridos con 0 % y 5 % de arancel respectivamente.	Código Eléctrico Colombiano - NTC 2050. Establece condiciones para la ubicación de equipos de carga de baterías y características generales para la carga de vehículos eléctricos.	Ley 143 de 1994 o ley eléctrica, en la cual se definen los tipos de usuarios (regulados y no regulados). Al ser no regulado se pueden negociar las tarifas directamente con el proveedor obteniendo mejores costos comerciales por nivel de uso.
Costa Rica	Ley 9518 de 2018. Incentivos y promoción para el transporte eléctrico. Crea el marco normativo para regular la promoción del transporte eléctrico en el país y fortalecer las políticas públicas para incentivar su uso dentro del sector público y en la ciudadanía en general.	Ley 9518 de 2018. Incentivos y promoción para el transporte eléctrico. Exonera de los siguientes impuestos a los vehículos eléctricos según su valor: Impuesto general sobre las ventas, Impuesto selectivo de consumo e Impuesto sobre el valor aduanero.	INTE/IEC 61851 -21-1:2018 y -1:2019. Sistema conductivo de carga para vehículos eléctricos. INTE/IEC 62660 -1:2018 y -2:2018. Celdas secundarias de ión-litio para la propulsión de vehículos eléctricos de carretera. INTE/IEC 62196 -3:2017, -1:2017 y - 2:2017. Bases, clavijas, conectores de vehículo y entradas de vehículo. Carga conductiva de vehículos eléctricos.	Resolución RE-0056-IE-2019, a través de la cual se definió una tarifa única de USD 0,30 para el funcionamiento de la red nacional de centros de carga rápida para vehículos eléctricos.

País	Promoción	Fuentes de Recursos	Tecnología	Operación
Argentina	4602-D-2019. Ley de Promoción de la Movilidad Sustentable, en donde se promueve la movilidad eléctrica incluyendo, directrices para la construcción de la infraestructura requerida.	Decreto 51 de 2018 estableció una reducción de 0% en la alícuota correspondiente al derecho de importación extrazona (D.I.E.). Además, estableció reducir los aranceles para los buses eléctricos de 35% a 10% hasta 350 buses.	No identificadas.	El Decreto 652 de 2002 establece que, por medio de criterios de oferta, demanda e ingreso medio kilométrico, la tarifa del servicio de transporte del AMBA es subsidiada. Ley 23349, los servicios de transporte de pasajeros, terrestres, acuáticos o aéreos, realizados en el país se encuentran gravados al 10.5%.
Chile	Ley de Eficiencia Energética que tiene como uno de sus pilares fundamentales la promoción de la electromovilidad en el sector público y privado. Resolución 2243 Exenta del MTT (2018). Aprueba protocolo técnico para obtener consumo energético en buses de transporte público urbano de la ciudad de Santiago	No identificadas.	Pliego Técnico Normativo RIC N° 15. Establecer requisitos de seguridad para instalar cargadores de vehículos eléctricos en las instalaciones de consumo de energía eléctrica del país.	Ley 20.378 con la cual se crea un subsidio nacional para el Transporte Público remunerado de pasajeros.

Fuente: BID.

6.3. Marcos fiscales y recursos para los sistemas

Además de entender la normatividad legal y estratégica aplicada en cada uno de los países y que influye en la estructuración de un proyecto de buses eléctricos, es importante conocer y evaluar el marco fiscal y las condiciones económicas con las cuáles se llevará a cabo la operación.

Marco fiscal

Definir las condiciones presupuestales de cada país en cuanto a su política fiscal

para los sistemas de transporte público y los beneficios o incentivos tributarios que pueden obtener para la adquisición de vehículos de tecnología limpia. En el caso de que la adquisición sea impulsada desde el sector público, es importante conocer las reglas o requisitos técnicos y legales que se deben cumplir para acceder a los recursos o fondos para la adquisición de la flota.

Fondos de contingencia

La fuente principal de los ingresos de los sistemas de transporte público es la demanda atendida y la tarifa que pagan los pasajeros por el servicio. Algunos sistemas cuentan con fondos de contingencia o de estabilidad financiera

donde se disponen recursos públicos para ayudar a su sostenibilidad. La implementación de buses eléctricos en un sistema de transporte público, supone una modificación en la estructura de los costos tanto de adquisición de la flota como de operación. Estos cambios deben ser tenidos en cuenta en la estructura de los fondos de contingencia de cada ciudad.

Recaudo electrónico

Como se mencionó anteriormente, el ingreso de los sistemas de transporte público, provienen principalmente del recaudo de las tarifas que pagan los usuarios. Por esta razón es importante la transparencia de este proceso para todos los agentes involucrados. Sobre esto, se debe analizar la normatividad que rige el recaudo en cada país y si es necesario

proponer las modificaciones que sean necesarias para implementar el recaudo electrónico como principal estrategia para el ingreso de recursos.

Tarifas eléctricas diferenciales

Un aspecto fundamental en la estructura de costos de los buses eléctricos es el suministro de energía para su funcionamiento. En este sentido, se debe revisar la normatividad existente en cada país y verificar que existan marcos regulatorios para que se considere, por parte de las empresas de energía, la aplicación de tarifas diferenciales como incentivo para la implementación de buses eléctricos en sistemas de transporte público.

5.

Modelos de negocio



La determinación del Modelo de Negocio es el elemento central a la hora de estructurar y poner en marcha un proyecto de buses eléctricos, entendiéndolo como la correcta articulación entre los principales componentes que lo conforman y que deben ser analizados, teniendo en cuenta las particularidades de cada ciudad y su

entorno de desarrollo. Los Modelos de Negocio de buses eléctricos se conforman de 4 elementos, ligados entre sí y que responden de manera específica cada uno de los siguientes interrogantes que se plantean a la hora de estructurar un proyecto de este tipo.

Figura 11

Componentes Modelo de Negocio para Buses Eléctricos



Fuente: WRI, C40, Citi Foundation y Financing Sustainable Cities Initiative

Tabla 19
Iniciaciones Componentes modelo de negocio

Componente	Subcomponente	Ejemplo
Activos. Inversiones requeridas para la puesta en marcha del sistema.	Activos Tangibles. Aquellos que son visibles y pueden negociarse directamente.	<ul style="list-style-type: none"> - Buses y Baterías. Elementos centrales de la tecnología. - Infraestructura de Recarga. Cargadores y demás elementos de la red eléctrica de distribución. - Patios y Talleres. Áreas requeridas para el parqueo y mantenimiento. Incluye locaciones para almacenaje de baterías. - Predios. Área donde se ubican las diferentes infraestructuras.
	Procesos. Corresponden a las actividades asociadas a la definición, obtención y puesta en marcha del sistema.	<ul style="list-style-type: none"> - Estudios y Planeación. Diseños y demás análisis requeridos para definir características. - Construcción e Instalación. Infraestructura y equipos que son armados y puestos en sitio. - Operación y entrenamiento. Funcionamiento y formación para la puesta en servicio. - Mantenimiento. Reparación y adecuación de equipos para garantizar el servicio.
	Activos Intangibles. Aquellos que no son negociables pero propios de cada proyecto según sus características.	<ul style="list-style-type: none"> - Seguridad. Confiabilidad y adecuados estándares para la prestación del servicio. - Ubicación eficiente. Adecuada relación espacio - operación. - Reputación. Buen servicio y estándares en calidad del aire y ruido. - Asequibilidad. Que pueda ser usado por los usuarios.
Fondeo. Recursos que permiten pagar las inversiones y el funcionamiento.	Ingresos. Corresponde a la recaudación directa por la operación o negocios asociados.	<ul style="list-style-type: none"> - Tarifa Usuario. Costo del boleto/tiquete por el número de pasajeros transportados. - Captura de Valor. Explotación comercial del suelo de patios y estaciones bajo diferentes modelos. - Publicidad. En estaciones, vehículos y otras infraestructuras. - Ahorros Operacionales. Por el uso de energías limpias y de menos costo de producción.
	Incentivos. Beneficios económicos para aumentar los recursos disponibles.	<ul style="list-style-type: none"> - Subvenciones. Subsidios directos al transporte bajo diferentes esquemas. - Fiscales. Reducción o eliminación de impuestos a la operación. - Precios diferenciales. Tarifas específicas para segmentos poblacionales, cubiertos con otras fuentes.

Componente	Subcomponente	Ejemplo
	Otras Fuentes. Ingresos adicionales o por otras actividades no asociadas.	<ul style="list-style-type: none"> - De otras áreas del gobierno. Ingresos externos de carácter público. - Impuestos dedicados. En otros sectores, pero con destinación al transporte público (sobretasa gasolina). - Ventas de activos y chatarrización. Actividades adicionales no operativas.
Financiamiento. Estructura financiera para apalancar la adquisición y operación.	Equity. Capital requerido para desarrollar el proyecto.	<ul style="list-style-type: none"> - Privado. Inversionistas directos o indirectos. - Público. Recursos directos de carácter público.
	Deuda. Préstamos para disponibilidad de recursos.	<ul style="list-style-type: none"> - Préstamos Bancarios. A través de entidades financieras públicas o privadas. - Préstamos Internacionales de Cambio Climático. Condiciones favorables de financiamiento. - Bonos Verdes. Deuda pública para proyectos sostenibles.
	Reducción de Riesgo. Mecanismos de mitigación financiera.	<ul style="list-style-type: none"> - Fondos de Contingencia. Destinado a cubrir los faltantes de la operación. - Contratos de provisión. Contrato directo para la adquisición y administración de activos. - Financiamiento Concesional. Esquemas financieros de apoyo.
Contratos. Esquemas jurídicos para la implementación de proyectos	Modalidades.	<ul style="list-style-type: none"> - Contratos de compra. Adquisición directa de los activos. - Contratos de alquiler. Arrendamiento de los activos. - Leasing de compra. Arrendamiento bajo la figura de leasing. - Concesión. Adquisición y operación por parte de un privado.
	Agentes.	<ul style="list-style-type: none"> - Públicos. Agencias y operadores públicos. - Privados. Inversionistas, operadores y fabricantes. - Mixtos. Público – privados.
	Marcos Habilitantes.	<ul style="list-style-type: none"> - Planes. Marcos Estratégicos Nacionales a nivel de políticas. - Leyes. Contexto jurídico que permite la implementación. - Regulaciones. Normas y condiciones para el desarrollo de los proyectos.

Fuente: BID a partir de WRI.

Como tal no existe un único Modelo de Negocio ideal para la implementación de buses eléctricos; por el contrario, hay gran cantidad de posibles combinaciones que se pueden desarrollar y por tanto la clave está en analizar varias alternativas bajo las condiciones particulares de cada proyecto y su entorno.

Para la estructuración de un adecuado modelo hay que partir de un contexto general de las necesidades a satisfacer y así tener claro la identificación de aquellas restricciones existentes y las posibles limitaciones en cada uno de los 4 componentes. Posteriormente, se deben analizar todas las posibles combinaciones bajo diferentes escenarios de tiempo, identificando qué funciona, qué no y por qué razón, de tal forma que se pueda llegar a una solución viable para todas las partes involucradas.

En este proceso hay que tener presente, que cada actor analiza y viabiliza el Modelo de Negocio desde sus criterios y necesidades, buscando cubrir sus objetivos de la mejor forma.

- **Gobierno:** Enfoca sus esfuerzos en el análisis costo - beneficio desde una perspectiva social (internalizando las externalidades) de tal forma que se logre una tarifa al usuario asequible, de la mano con una sostenibilidad fiscal que no vaya a poner en riesgo las finanzas públicas.

- **Operador de transporte público:** Los operadores buscan que los modelos de negocio les permitan realizar la transición tecnológica sin poner en riesgo la estabilidad de su negocio, de acuerdo con las condiciones contractuales y los niveles de rentabilidad buscados. Por lo anterior el análisis se centra en lograr indicadores financieros rentables, principalmente TIR y VPN.

- **Entidades Financieras:** Se enfoca en minimizar el riesgo de repago de los instrumentos financieros, definiendo adecuadamente la estabilidad de las fuentes de pago y la manera correcta de mitigación de los riesgos asociados a la falta de liquidez.

- **Fabricantes:** Su propósito es lograr la masificación de la tecnología, por lo cual juegan un papel importante en generar mecanismos para su sostenibilidad, en donde pueden llegar a participar directamente del financiamiento. Así mismo, logran parte de su rentabilidad a través de la definición de contratos a largo plazo para temas de mantenimiento y garantías.

- **Proveedores de energía:** Aunque su negocio no se centra de manera exclusiva en la distribución de energía para buses eléctricos, si es un mercado potencial para cubrir sus expectativas y se ha convertido en un nuevo negocio que cada vez cobra más relevancia en su sector, por lo cual ha buscado hacerse parte de los mecanismos de financiación para la masificación de la tecnología.

Si bien, este proceso puede llegar a ser iterativo, lo importante es tener la mayor cantidad de información de calidad, ya que cada variable analizada es sensible respecto de los resultados obtenidos. En este sentido, una parte importante en la generación de los modelos es la recopilación de información y la parametrización de la misma.

A continuación, se hace una descripción de los componentes a considerar en el diseño adecuado del Modelo de Negocio y aquellos identificados y propuestos en la región.

5.1.

Fuentes de recursos e ingresos

Tal vez el reto más importante a la hora implementar cualquier proyecto de buses, sin importar el tipo de tecnología que se use, es garantizar su estabilidad económica; la cual se logra con el adecuado balance entre los costos de propiedad, operación y mantenimiento, contrastado con los ingresos o fuentes de recursos disponibles para su pago. Esta situación puede llegar a ser aún más compleja en el caso de los buses eléctricos, por su alto costo de capital.

En LAC el desafío es aún más grande cuando el sistema de transporte tiene como única fuente de recursos la tarifa al usuario, es decir que a partir del recaudo obtenido por el número de tiquetes vendidos se deben costear todos los gastos asociados a la adquisición y operación de los buses.

Este esquema de auto sostenibilidad poco a poco ha venido desapareciendo, ya que la experiencia internacional ha demostrado que tener un sistema de calidad requiere fuentes adicionales o apoyos económicos para garantizar una adecuada prestación del servicio. El caso de los buses eléctricos no es la excepción y, por el contrario, son más las estrategias y mecanismos que se deben explorar a la hora de buscar fuentes de recursos que permitan su viabilidad; siendo los beneficios fiscales y las subvenciones las principales herramientas. En la región son limitadas las experiencias que permiten la generación de fuentes alternativas para los sistemas de transporte como la captura de valor, los impuestos focalizados, la publicidad, los fondos de compensación tarifaria, las tasas por congestión o estacionamiento, entre otros.

Tabla 20**Ingresos e Incentivos Sistemas de Transporte Público en la Región**

Ciudad	Ingresos	Incentivos	Otras Fuentes
Lima	-Tarifa Usuarios (tiquetes vendidos).	-Exoneración: Ad/Valorem, Impuesto Selectivo al consumo y Sobretasa Tributo. -Precios diferenciales en la energía eléctrica dependiendo el consumo.	N/A
Bogotá	-Tarifa Usuarios (tiquetes vendidos). -Fondo de Estabilización Tarifaria (FET) cuya disponibilidad de recursos se encuentra garantizada con el compromiso de pago extendido por el Distrito.	-Exoneración del IVA. -Impuesto de renta de la empresa: Reducción de hasta 100% del costo del bus. -Tasa de importación: Reducción de 38% a 0%. -Tarifas menores en la energía para usuarios no regulados.	-Publicidad -Chatarrización -Pico y Placa solidario
Medellín	-Tarifa Usuarios (tiquetes vendidos) (más del 99% de los ingresos).	-Al ser una operación pública la ciudad adquiere los vehículos con recursos públicos. -Exoneración del IVA. -Impuesto de renta de la empresa: Reducción de hasta 100% del costo del bus. -Tasa de importación: Reducción de 38% a 0%. -Tarifas menores en la energía para usuarios no regulados.	-Publicidad -Arriendo locales en infraestructura - Chatarra para el reciclaje de partes.
Cali	-Tarifa Usuarios (tiquetes vendidos). - Fondo de Estabilización y Subsidio a la Demanda (FESDE) que se nutre con fondos del gobierno local.	Exoneración del IVA. -Impuesto de renta de la empresa: Reducción de hasta 100% del costo del bus. -Tasa de importación: Reducción de 38% a 0%. -Tarifas menores en la energía para usuarios no regulados.	El FESDE se ha empezado a nutrir en menor proporción de otras fuentes: -Contribución por estacionamiento. -Explotación estacionamiento en vía. -Tasa por con congestión. -Participación por rodamiento de vehículos.

Fuente: BID a partir de consultorías de apoyo a la implementación de buses eléctricos en la región – Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

Ciudad	Ingresos	Incentivos	Otras Fuentes
Buenos Aires	<ul style="list-style-type: none"> - Tarifa Usuarios (tiquetes vendidos). - Tarifa Subsidiada (cerca del 67%). 	<ul style="list-style-type: none"> -Alícuota de importación del 0%. -Aranceles para los buses eléctricos de 35% a 10% hasta 350 buses. 	N/A
Santiago	<ul style="list-style-type: none"> - Tarifa Usuarios (tiquetes vendidos). - Tarifa Subsidiada (cerca del 67%). 	N/A	-Publicidad

Sin duda el camino recorrido en la región para incorporar fuentes adicionales a la tarifa es muy poco, por lo cual los subsidios y los fondos de estabilización tarifaria siguen siendo el principal soporte para el mantenimiento de la operación y por consiguiente son un elemento clave para poner en marcha sistemas de buses eléctricos. La clave está en identificar nuevas fuentes de financiamiento y ver hacia donde deben dirigirse los subsidios o el apoyo de recursos públicos, ya que el sostenimiento de la operación puede ser un gasto recurrente que impacta las finanzas públicas en el largo plazo. Para el caso de los buses eléctricos, puede que la inyección de recursos públicos para cubrir parte del CAPEX, ya sea a través de incentivos o apropiaciones directas, permita mejorar las condiciones dentro del modelo de negocio.

Otro aspecto a tener en cuenta es que los ingresos y demás fuentes existentes en los sistemas de transporte, no sólo están destinados al pago de la operación de transporte y por consiguiente a la adquisición y funcionamiento de los buses. Cada proyecto tiene unos costos administrativos, asociados al recaudo, la administración de los recursos, el sostenimiento de las entidades públicas encargadas de la gestión y planeación, entre otros; que en algunos casos podrían ser cubiertos mediante fuentes externas, aliviando la remuneración. Para el caso de la región, son variados los agentes que están incluidos dentro de los costos administrativos y cuya remuneración, en ocasiones, está definida como un porcentaje de la recaudación obtenida por la venta de tiquetes.

Tabla 20**Ingresos e Incentivos Sistemas de Transporte Público en la Región**

Ciudad	Agentes	Remuneración
Lima	Operadores de Transporte	<p>Resulta del cálculo del valor licitado por kilómetro por los kilómetros eficientes autorizados y el valor licitado por pasajero por el número de validaciones correspondientes a los pasajeros equivalentes en un porcentaje 70% - 30%. Esto indica que el 70% de los kilómetros recorridos son remunerados y el 30% de pasajeros transportados son remunerados.</p> $POT = [\alpha * PEK + (1-\alpha) * PEP]$ <p> <i>POT</i> = Participación del operador de transporte en el periodo <i>PEK</i> = Participación equivalente por kilómetro del operador <i>PEP</i> = Participación equivalente por pasajero α = Ponderador de pago </p> <p>Sin embargo, como en la práctica el ingreso no es suficiente para cubrir el resultado de este cálculo, los operadores reciben porcentualmente la diferencia entre los ingresos totales menos la remuneración del concedente y otras remuneraciones.</p>
	Otros Agentes (Administrativos y de gestión)	<ul style="list-style-type: none"> - Protransporte (Concedente): 3% de la recaudación por tiquetes - Invermet (Encargado de la supervisión): 0,5% de la recaudación por tiquetes - Fiducia: 0,1% de los recursos gestionados a través de la fiducia - Operador de recaudo: 3% de la recaudación por tiquetes - Adicionalmente un 2% de la recaudación se destina a un fondo de reserva
Bogotá	Operadores de Transporte	<ul style="list-style-type: none"> - Operadores de Transporte Trocales Fase I y II: Pago de los kilómetros programados y recorridos por cada concesionario multiplicado por las tarifas por kilómetro pactadas y actualizadas. - Operadores de Transporte Troncales Fase III: Pago por vehículo, por kilometraje efectivamente recorrido y por la participación económica obtenida de multiplicar por un factor de calidad $f(Q)$ que tomará un valor mínimo de 0,97 y máximo de 1,00. Este factor está basado en índices de puntualidad y regularidad. - Operadores de Transporte Zonales: pago por vehículo, por kilometraje efectivamente recorrido según la tipología y por los pasajeros transportados en su zona asignada; junto con la participación económica obtenida de multiplicar por un factor de calidad $f(Q)$ que tomará un valor mínimo de 0,97 y máximo de 1,00. - Operadores de Alimentación: Con base en los pasajeros transportados en alimentación y los costos ofertados y ajustados. - Operador Troncal Fase IV: Pago de tarifa por provisión de vehículo, pago por costos fijos de operación y pago de tarifa por kilómetro recorrido. - Operador Fase V Zonal: Tarifa por provisión (tarifa vehículo + tarifa administrativa + tarifa patio) y tarifa por operación (costos fijos + kilómetros recorridos + tarifa usuario).
	Otros Agentes (Administrativos y de gestión)	<ul style="list-style-type: none"> - Recaudo: Esta compuesta por 4 componentes. Remuneración fija, remuneración variable, remuneración por vehículos con equipos a bordo y remuneración de equipos adicionales. Finalmente, la participación económica obtenida se debe multiplicar por un factor de calidad $f(Q)$ que tomará un valor mínimo de 0,97 y máximo de 1,00. - Fiducia: Comisión sobre los rendimientos financieros, equivalente al 14,667% incluido IVA. - Ente Gestor (Transmilenio S.A.): 4% sobre los ingresos del fondo principal; 3,53% de los ingresos brutos Fase II; 2,5% de los ingresos brutos de la Fase I para los Concesionarios que vincularon flota adicional; multas operativas al recaudados; 10% de las multas a los concesionarios de alimentación y Fase II; y multas administrativas a todos los concesionarios.

Ciudad	Agentes	Remuneración
Medellín	Operación Pública	<p>Al ser una operación pública los ingresos aparte de cubrir los costos asociados a la operación como tal, incluyen los siguientes costos administrativos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Remuneración Empresa Metro de Medellín (11%): Margen de operación del Metro de Medellín, equivalente al 11% de los egresos operacionales. - Transferencias férreo y cable: Transferencias a los Sistemas Metro y Cable por compensación de los pasajes integrados. - Administrador Financiero: Costo del administrador del fideicomiso del sistema. Los últimos años, debido a la estabilidad y volumen de esta bolsa, el administrador del fideicomiso ha condonado este costo. - Agente de crédito RCC: Pago del crédito de compra de los sistemas de recaudo actualmente en operación. - Remuneración C3 y C6: Transferencia a los operadores de las Cuenca 3 y 6 por la operación de sus servicios de transporte, que se encuentran concesionados.
Buenos Aires	Operadores de Transporte	<p>Teniendo en cuenta que el sistema es altamente subsidiado (54%), la remuneración a los operadores de transporte se realiza por kilómetro recorrido, dependiendo de las tarifas establecidas según el tipo de servicio.</p>

Fuente: BID a partir de consultorías de apoyo a la implementación de buses eléctricos en la región - Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

Como se observa, el abanico de agentes que son remunerados en los sistemas de transporte es muy variado, siendo los operadores de transporte, por obvias razones, quienes mayor proporción y recursos reciben; y con los cuales se debe estructurar un modelo de negocio que permita la viabilidad económica y financiera del sistema. Es importante resaltar que, cada sistema cuenta con una estructura administrativa que debe ser analizada y considerada en el diseño de los modelos de negocio que se decidan implementar. Para el caso de los buses eléctricos, es ideal establecer esquemas de remuneración que se ajusten a las particularidades operacionales y funcionales de la tecnología, por lo cual se deben definir metodologías y parámetros específicos para cada caso.

En este sentido, uno de los estudios apoyados por el Banco en la región estuvo encaminado específicamente a la

determinación de los costos y tarifas de remuneración por vehículo y por kilómetro, para buses eléctricos de la flota Troncal y No troncal de la Fase III del Sistema Integrado de Transporte Público (SITP) de Bogotá. Lo anterior en el marco de un proceso de renovación que tiene como objetivo la inclusión de más de 100 buses eléctricos, los cuales deberán ser remunerados a los operadores de transporte bajo las condiciones particulares de su adquisición y operación.

En los contratos de concesión desarrollados para la operación de buses eléctricos de Transmilenio, se ha establecido una metodología de remuneración que está basada en una tarifa por vehículo y por kilómetro para cada una de las tipologías disponibles. A continuación, se presenta un resumen de los elementos considerados en la remuneración.

Tarifa por Vehículo

Se establece teniendo en cuenta el costo del bus, la batería y el sistema de recarga, junto con sus respectivas vidas útil. También incluye costos asociados con el seguro obligatorio SOAT, seguro todo riesgo e impuestos.

Los resultados obtenidos para las tipologías analizadas, expresada en COP/mes son las siguientes:

Tabla 13

Costos promedios en LAC para bus padrón eléctrico de 12m.

Tipo de operación	Troncal	No troncal		
		Bus padrón	Bus busetón	Bus buseta
Costo por vehículo (COP)	Bus padrón dual	Bus padrón	Bus busetón	Bus buseta
Valor de vehículo	6,966,949	6,690,736	4,194,111	2,694,111
Valor de la batería 1	5,277,263	5,575,242	4,492,752	4,638,164
Valor de la infraestructura	1,679,691	1,945,748	1,945,748	1,945,748
Seguros	2,090,710	1,641,939	1,380,231	1,043,184
Costo Impuesto	196,842	195,319	140,368	96,254
Revisión Técnico-Mecánica	24,972	24,972	24,972	24,972
Arrendamiento de patios	N/A	390,465	242,452	206,791
TMVZ (COP/mes)	16,236,428	16,246,420	12,870,630	10,649,225

Fuente: Costos y tarifas de remuneración por vehículo y por kilómetro, para vehículos eléctricos de la flota Troncal y No troncal de la Fase III del Sistema Integrado de Transporte Público SITP – Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

Tarifa por Kilómetro

Se determina a partir de los costos operativos (combustible, mantenimiento, neumáticos, salarios y otros), los cuales son indexados en cada año que se aplique la remuneración. Los resultados obtenidos para cada tipología fueron los siguientes.

Tabla 23

Tarifa por Kilómetro propuesta para la implementación de buses eléctricos en Bogotá

Tipo de operación		Troncal		No troncal					
Tipología		Padrón dual		Padrón		Busetón		Buseta	
Variables Bus Eléctrico	Parámetro	%Pond.	COP/Km	%Pond.	COP/Km	%Pond.	COP/Km	%Pond.	COP/Km
Combustibles	%C	16.07%	390.73	17.20%	412.13	16.27%	345.76	16.62%	322.99
Lubricantes	%L	1.24%	30.06	1.25%	30.06	1.41%	30.06	1.28%	24.98
Neumáticos	%N	4.05%	98.49	4.10%	98.25	3.35%	71.23	3.24%	63.00
Mantenimiento	%M	23.87%	580.51	24.47%	586.42	24.28%	515.97	22.69%	441.14
Mantenimiento sistema recarga	%MSR	2.06	50.07	2.49%	59.56	2.79%	59.29	3.02%	58.78
Salarios	%S	36.18%	879.89	46.51%	1,114.51	47.92%	1,018.51	48.83%	949.25
Servicio y lavado y costos F.	%F	16.54%	402.14	3.98%	95.31	3.98%	84.67	4.31%	83.68
Total		100.00%	2,431.89	100.00%	2,396.23	100.00%	2,125.50	100.00%	1,943.82

Fuente: Costos y tarifas de remuneración por vehículo y por kilómetro, para vehículos eléctricos de la flota Troncal y No troncal de la Fase III del Sistema Integrado de Transporte Público SITP – Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

5.2.

Esquemas de financiamiento

Lograr definir un esquema de financiamiento adecuado para la adquisición y operación de un sistema de buses eléctricos es un reto complejo, debido a la incertidumbre que existe sobre este tipo de tecnologías, el monto de la inversión inicial y en general a la cantidad de variables que hay que analizar, dependiendo del contexto de cada una de las ciudades. Tanto la participación pública como la privada, requieren esquemas que

permitan asegurar o garantizar el repago del financiamiento de los proyectos durante su periodo de ejecución. A continuación, se muestra un resumen de los mecanismos que se han venido desarrollando en torno a esta tecnología, algunos de los cuales son aplicables exclusivamente a este tipo de proyectos, debido a las características particulares de los buses y su infraestructura.

Tabla 20**Ingresos e Incentivos Sistemas de Transporte Público en la Región**

Tipo de Adquisición	Esquema de Financiamiento	Características
Compra Directa	Recursos públicos directos para compra inicial	Sigue siendo una opción popular en muchos lugares del mundo, sin embargo, no es muy común en la región, donde sólo en Medellín se ha realizado. Básicamente es la utilización de presupuesto público (local o nacional) para la adquisición inicial de los activos, con lo cual se logra obtener algunas subvenciones o incentivos. Con este esquema se mitigan posibles sobrecostos por remuneración a privados y la barrera de la alta inversión inicial.
	Unión de esfuerzos con diferentes fuentes	Una forma de reducir los costos iniciales es aprovechar las economías de escala, formar equipo con otra ciudad u operador y trabajar con el proveedor para un mejor trato para un contrato más grande. Reunir a más de un agente puede tener desafíos. Muchas ciudades tendrán diferentes requisitos técnicos, los plazos para las entregas pueden no coincidir y la redacción de especificaciones que unifiquen todos los requisitos puede llevar mucho tiempo. Sin embargo, puede valer la pena en ahorros de costos.
Financiamiento de Deuda	Préstamos Comerciales	A través de entidades financieras públicas o privadas se obtienen deudas para apalancar la adquisición inicial o para el mantenimiento de la operación, según sea el caso y sin importar si es gestionado por una empresa privada o pública. Este tipo de mecanismos tienen grandes restricciones debido a la aversión al riesgo por parte de las entidades financieras y la falta de garantías concretas de repago de la flota.
	Préstamos Concesionales	Son proporcionados por entidades financieras en condiciones de préstamo flexibles, con tasas de interés más bajas y/o plazos de pago más largos. Se utilizan por lo general para la adquisición de buses por operadores privados. En el caso de Curitiba, se adquirieron buses utilizando un préstamo en condiciones favorables del Banco de Desarrollo de Brasil (BNDES).
	Préstamos Internacionales de Cambio Climático	Es un tipo de Préstamo Concesional que utiliza recursos provenientes de fondos asociados a cambio climático, para así ofrecer condiciones favorables de financiamiento. En el caso de Bogotá, la concesión fue posible gracias al otorgamiento de préstamos por parte del Banco Colombiano de Desarrollo Empresarial y de Exportación (Bancóldex) a intermediarios financieros locales, utilizando recursos financieros (US\$ 40 millones) que se pusieron a disposición por parte del Fondo de Tecnología Limpia (CTF) y el BID.
	Bonos Verdes	Los bonos verdes comparten las mismas características financieras que otros bonos, pero el 95% de sus ganancias deben financiar proyectos con un impacto ambiental y climático positivo, como son los buses eléctricos. Sin embargo, su uso en este mercado no es muy común y se ha hecho a través de la combinación de varias fuentes, como en el caso de Tianjin - China, en donde se complementó con presupuesto nacional para la adquisición de 500 buses.
Arrendamiento (Leasing)	Contrato de Arrendamiento con opción de compra	Consiste en arrendar los autobuses, baterías e infraestructura, a un tercero quien posee legalmente algunos o todos los activos y asume los riesgos asociados con la inversión. Este tercero podría ser un fabricante, un proveedor de servicios o una empresa financiera especializada. Este esquema permite al operador pagar el alquiler del activo en un periodo determinado y luego comprarlo a un precio pactado, garantizando su adquisición sin inversiones iniciales muy grandes.
	Contrato de Compra - Arrendamiento	También es un esquema de arrendamiento en donde después de vender el activo a un comprador, el vendedor contrata con este mismo su arrendamiento. Se usa más que todo en donde las compañías de arrendamiento no tienen permitido comprar vehículos directamente.

Tipo de Adquisición	Esquema de Financiamiento	Características
	Arrendamiento de Componentes	Se usa más que todo para las baterías y consiste en que el fabricante o un tercero ofrece al operador la opción de arrendar las baterías durante un plazo definido y las reemplaza según sea necesario. Algunos fabricantes que usan este esquema son Volvo en Bogotá y Proterra en EEUU. En la práctica el fabricante vende el bus eléctrico a un precio cercano a uno diésel (nivelando los costos iniciales), al convertir el costo de capital de las baterías en un costo operativo el cual puede ser cubierto con los ahorros operativos que permite esta tecnología.
	Arrendamiento Operativo	Es un contrato que permite el uso del bus, pero no trasfiere la propiedad del vehículo. El operador se limita al pago oportuno de un canon y asume la responsabilidad de los impuestos, mantenimiento y seguros: mientras el mantenimiento por lo general, se realiza mediante contratos aparte.
	Arrendamiento Financiero	A diferencia de los otros tipos de arrendamientos, los arrendamientos de capital se parecen mucho más a los préstamos y generalmente requieren que el arrendatario tenga un balance sólido. La duración del arrendamiento es cercana a la vida útil del activo e incluye un valor residual y un acuerdo de recompra que se aplica al final del plazo del arrendamiento.

Fuente: Basados en *Investments in Electric Buses for Public Fleets: Ten Questions for City Decision-Makers*. WRI y *Electric Buses in Cities* – Bloomberg, *New Energy Finance*.

5.2.1.

Esquemas financieros analizados y desarrollados en LAC

Lima

Dentro de los estudios que ha venido acompañando el Banco en varios países de la región, se han identificado diferentes esquemas de financiamiento para el desarrollo de los proyectos. En el caso de Lima, después de algunas entrevistas con operadores y fabricantes se logró definir una dirección clara sobre el modelo de negocio de preferencia, el cual separa la propiedad de la operación. Este es un esquema ofrecido por las empresas de energía que, en su afán de proporcionar estrategias que permitan la masificación de la tecnología eléctrica, presentan su interés mediante el financiamiento tipo leasing operativo a los operadores.

En el análisis se revisaron tres opciones

sostenibles y de largo plazo, comparadas con la tecnología gas y diésel, y bajo las siguientes condiciones:

Bus diésel y gas natural: Tasa 10%, plazo 6 años, deuda 80% y periodo de gracia 6 meses (Condiciones promedio con las que los concesionarios se han financiado).

Eléctrico financiamiento y leasing parcial: Tasa 7%, plazo 10 años, deuda 90% y periodo de gracia 36 meses.

Eléctrico leasing total: Tasa 7%, plazo 14 años, deuda 90 % y periodo de gracia 36 meses.

Tabla 23

Tarifa por Kilómetro propuesta para la implementación de buses eléctricos en Bogotá

Resultado consolidado de los modelos de negocio					
Tecnologías	Diésel	Gas	Eléctrico Fin.	Eléctrico Lease P.	Eléctrico Lease T.
Inversión inicial Cap. propio (S./)	116,679	139,938	147,251	109,034	47,063
TIR	4.56 %	17.29 %	20.01 %	22.81 %	26.50 %
VPN (S./)	- 46,999	108,490	114,755	116,453 %	104.239
Recuperación de inv. (años)	-	9.6	11.4	10.9	7.2
Índice de rentabilidad	-40.3 %	77.5 %	77.9 %	106.8 %	221.5 %

Fuente: Análisis y Diseño de Modelos de Negocio y Mecanismos de Financiación para Buses Eléctricos en Lima, Perú. - Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

De la modelación realizada se obtuvo que, aunque en el leasing total la tasa de interés está gravada por el Impuesto General a las Ventas (IGV=16%), los indicadores financieros son más favorables que en los otros esquemas debido a que la totalidad del vehículo es repagada en un plazo igual a su vida útil, que para este caso fue 14 años.

Bogotá

En el caso de Bogotá, los nuevos contratos de concesión que se vienen estructurando y licitando se basaron en dos esquemas de financiamiento: i) financiamiento comercial (banca) y ii) financiamiento a través del proveedor (leasing). Independiente del esquema se definieron algunas condiciones de cumplimiento:

Financiamiento integral del bus y batería (no separabilidad).

Plazos entre 5 – 10 años.

Garantías requeridas:

- Tomar directamente el ingreso de los buses eléctricos como fuente de pago a manera de cesión de los derechos sobre el ingreso, lo cual genera que el flujo ingreso sirva como fuente de pago y garantía al mismo tiempo.
- Evaluar la prelación de pago que tienen los componentes operacionales (OPEX) y subrogar el servicio de deuda a la estructura de caja que se determinaría para este esquema.

Tabla 26

Implicaciones, Condiciones y Resultados de los Esquemas Financieros en Bogotá

Esquema de Financiamiento	Implicaciones	Condiciones	Resultados
Financiamiento Comercial	<ul style="list-style-type: none"> •Deducibilidad de intereses del impuesto de renta. • Creación de mecanismo de fuente de pago y garantía. 	Plazo: 10 años Tasa EA: 8,5% Estructura: 80% financiamiento, 20% equity	Padrón Dual <ul style="list-style-type: none"> • Recuperación inversión: 13.9 años • VPN = COP46,04 millones Padrón • Recuperación inversión: 13.9 años • VPN = COP46,04 millones
Financiamiento a través del proveedor (leasing)	<ul style="list-style-type: none"> • Sobrecosto de Impuesto al Valor Agregado (IVA) por el 19% sobre los intereses. • Deducibilidad 100% del canon (capital e intereses). • IVA no descontable para el operador, generaría gasto. 	Plazo: 10 años Tasa EA: 8,5% Estructura: 80% financiamiento, 20% equity	Padrón Dual <ul style="list-style-type: none"> • Recuperación inversión: 12.5 años • VPN = COP40,7 millones Padrón • Recuperación inversión: 12.5 años • VPN = COP41,28 millones

Fuente: Costos y tarifas de remuneración por vehículo y por kilómetro, para vehículos eléctricos de la flota Troncal y No troncal de la Fase III del Sistema Integrado de Transporte Público SITP. – Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

Los resultados de los análisis efectuados para el caso de Bogotá demostraron que, bajo las condiciones de financiamiento planteada, las únicas tipologías atractivas para el inversionista son el Padrón, en donde a pesar que el VPN del esquema de leasing es inferior al del esquema de financiamiento comercial, los riesgos tecnológicos percibidos por el concesionario serían transferidos. La explicación por la cual el VPN en el caso del leasing es inferior se debe a que el mecanismo es un servicio cuya tasa de interés se encuentra gravada con el IVA por lo cual el financiamiento es más costoso.

En este mismo ejercicio fueron evaluadas otras tipologías, como el busetón y la buseta, encontrando que para esos casos el VPN es menor a cero bajo cualquier esquema de financiamiento, por lo que para estas tipologías se estima que el

inversionista requiere condiciones de financiamiento favorables de al menos 12 años de plazo, 8% de tasa de interés y 36 meses de periodo de gracia para la tipología busetón; y 13 años de plazo, tasa del 7,5%, 36 meses de gracias y porcentaje de deuda del 90% para la buseta.

Buenos Aires

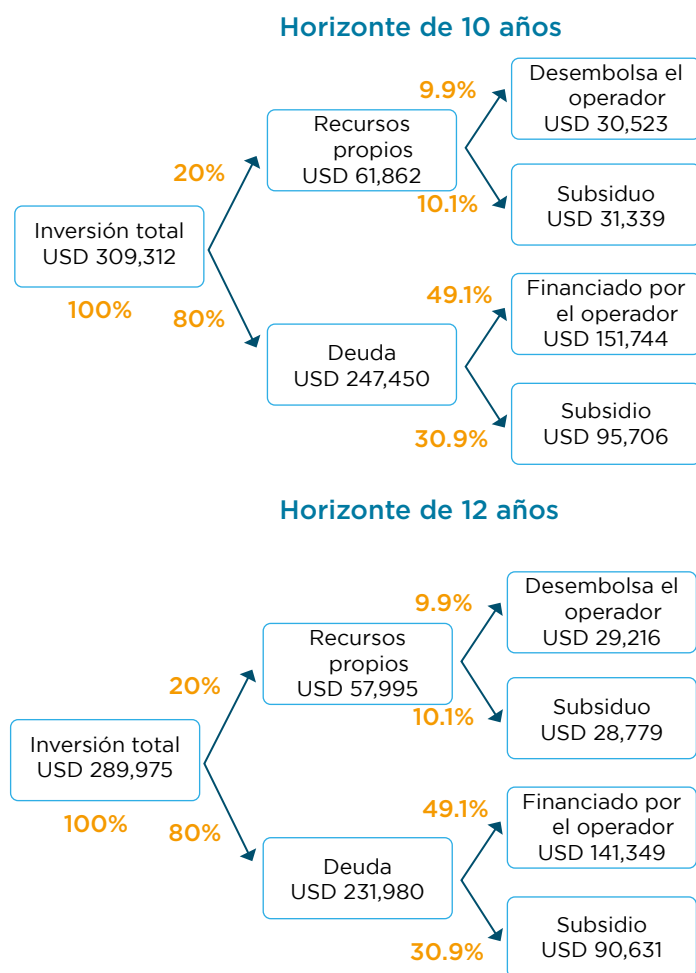
El caso de Buenos Aires es tal vez de los más complejos y no por la escogencia de un esquema de financiamiento, sino por las condiciones económicas del país. En Argentina las tasas de financiamiento comercial para colectivos han variado del 54% EA en septiembre de 2018 al 85% EA en octubre de 2019. Para el 15 de octubre de 2019 y según la base de datos del banco Central de la República de Argentina, la tasa interbancaria era de 67,21% y la pasiva de 57,62%.

Según los estudios desarrollados con apoyo del Banco, para facilitar la implementación de buses eléctricos en el corto plazo sería necesario analizar la posibilidad de subsidiar la tasa de financiamiento, de otra manera y al igual que para los buses diésel, sería improbable que alguno de los operadores contemple la renovación de flota. Se estima que es necesario diseñar líneas de crédito con tasas

subsidiadas para ofrecer financiamiento a los operadores a tasas cercanas al 17% y plazo de hasta 60 meses. Así mismo, otra acción complementaria es subsidiar parte del capital inicial para la adquisición, con lo cual se mitigan los altos costos de la tecnología. Bajo estas premisas, se establecieron ciertos requerimientos de apoyo económico para escenarios de financiación comercial a 10 y 12 años.

Figura 12

Distribución de la inversión para viabilizar un bus eléctrico en Buenos Aires



Fuente: Diseño de estrategias y mecanismos de financiación para buses eléctricos en Buenos Aires, Argentina. - Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

Santiago

En el esquema de financiamiento utilizado en Santiago de Chile, y por la separación que existió de la operación respecto a los proveedores de flota, los operadores no requirieron realizar una alta inversión inicial. El modelo presentado recoge características del leasing operativo y debido a que actualmente los buses eléctricos no cuentan con un mercado de usados establecido, el valor total del vehículo se amortiza durante el periodo financiado, 10 años, y al final del repago, la propiedad es transferida al estado.

Por otra parte, la presencia de los subsidios a la tarifa con que cuenta el sistema de transporte, actúa como un ingreso mínimo garantizado, el cual el estado ha ofrecido como garantía a los inversionistas de los buses eléctricos, ENEL y ENGIE, y el cual es empleado para repagar el “leasing”.

Medellín

En Colombia existe una gran variedad de fuentes de financiamiento públicas y privadas para el sector del transporte público. Sin embargo, predomina el uso de la banca comercial, principalmente por la dificultad que presentan los modelos de operación actual y sus operadores para cumplir los requerimientos de los financiamientos alternativos.

En el caso de Medellín la situación es diferente, dado que al ser una operación 100% pública la ciudad ha tomado la decisión de adquirir los vehículos eléctricos a través de una licitación de compra, debido a la disponibilidad actual de recursos, proporcionados por la administración municipal, y la intención de no incrementar la deuda de la ciudad para los próximos años. Con esta decisión se descarta la necesidad de contar con

un mecanismo de financiamiento de la flota, así como sus impactos financieros. Esta situación hace que el proyecto en conjunto, tenga una VPN positivo de COP 3.098 millones con una TIR del 12% y relación beneficio costo de 1.08, lo cual demuestra los buenos resultados que se obtienen al disponer de recursos públicos para la adquisición inicial de los activos.

Ciudad de Guatemala

En Guatemala se vienen realizando estudios, con el apoyo del Banco, para la posible implementación de buses eléctricos en la Línea 5 del sistema BRT Transmetro. Dentro de los análisis desarrollados se ha estimado la necesidad de incorporar 17 buses eléctricos de 90 pasajeros, cada uno; con recarga nocturna en patio a través de 10 cargadores de enchufe (manguera) con al menos 75KW de potencia en cada una de éstas; y evaluado diferentes esquemas de financiamiento. Como resultado se ha obtenido que el esquema con mayores beneficios es el financiamiento comercial, siempre y cuando se realice con algunas condiciones preferenciales como una tasa de interés del 10% y pago inicial del 20%.

Tabla 27

Esquemas de financiamiento analizados en Guatemala

Compra	Financiamiento (8 años, TI 10%, pago inicial 20%)	Alquiler (No hay pago inicial)
Un único desembolso para la compra de la flota. Permite ahorros importantes en el flujo de caja ya que no se requiere otros desembolsos.	Requeriría un menor desembolso inicial al escenario de compra y desembolsos programados por un plazo fijo. Permite búsqueda de créditos blandos, generando pagos menores que el esquema de alquiler	No requiere inversión inicial. Implica desembolsos permanentes, sin pago inicial, con una tasa de interés estimada en 13%
Diferencia en la inversión: US\$ 2,6 millones	Pago mensual: US\$ 200.000	Pago mensual: US\$ 253.000
VPN: ~ US\$ 537.000	VPN: ~ US\$ 560.000	VPN: ~ US\$ 226.000
TIR = 12,6%	TIR = 16%	TIR = ND (No hay inversión inicial)

Fuente: Análisis de implementación de flota eléctrica en la Línea 5 de Transmetro, en Guatemala. – Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

5.3. Contratos

La búsqueda de nuevos esquemas de contratación de buses eléctricos surge como una necesidad de establecer una distribución eficiente de los riesgos que pueden existir en proyectos de implementación de este tipo de vehículos por cuenta de los altos costos de capital que implica la adquisición y por las incertidumbres que aún existen en las condiciones de operación y de requisitos de infraestructura para su funcionamiento. Esto ha llevado a los países a diseñar esquemas de contratación con diferentes combinaciones de los actores interesados. Así, pueden existir contratos entre Gobierno y propietarios de los buses, Gobierno y operadores, operadores y generadores de energía, etc.

Desde la perspectiva de los gobiernos, el esquema de contratación puede variar si las ciudades son las que compran los buses como el caso de Medellín, donde además la

ciudad es la encargada de la operación; o si contratan los servicios de operación y adquisición, como en Santiago de Chile. En este sentido, las ciudades enfrentan complejos retos en lo relacionado con la contratación y operación de sus sistemas de transporte, y más aún cuando estos involucran buses eléctricos, por los costos de adquisición, la falta de cadenas de suministro desarrolladas, además de otros riesgos percibidos. Justamente los esquemas de contratación son definidos en buena medida luego del análisis de los riesgos y barreras que se tengan en cada país.

Algunos de los riesgos que se definen y se asignan en los contratos de adquisición e implementación de buses eléctricos tienen que ver con las especificaciones de los vehículos, el manejo de interfaces, los prototipos y tiempos de recarga, gestión predial y de adquisición del espacio físico de los patios, mantenimiento de los vehículos y de la infraestructura.

Recientemente se han adoptado formas de contratación y de negocio en las

que están surgiendo nuevos actores como fabricantes, empresas de servicios públicos y entidades financieras las cuáles están asumiendo un papel cada vez más importante en los contratos de adquisición y operación de buses eléctricos. Estos actores se relacionan de diferentes formas, de acuerdo a los mecanismos y políticas habilitadas en cada esquema.

5.3.1.

Particularidades de la contratación en LAC

Lima

La implementación de flotas eléctricas en Lima enfrenta un reto importante que tiene que ver con el plazo de las concesiones para lograr amortizar esta tecnología. Los contratos de Concesión actuales tienen una duración de 10 años, con la posibilidad de extender por 5 años más si se actualiza la flota de acuerdo a lo propuesto en la licitación. Para lograr la inclusión de flotas eléctricas, se avanza en dos estrategias. La primera consiste en revisar las condiciones de remuneración y así acelerar el periodo de retorno de la inversión y la segunda consiste en solicitar al Ministerio de Economía y Finanzas que la implementación de flota eléctrica sea considerada dentro de la optimización de la oferta del contrato de concesión y así obtener el plazo adicional requerido para la amortización de los costos.

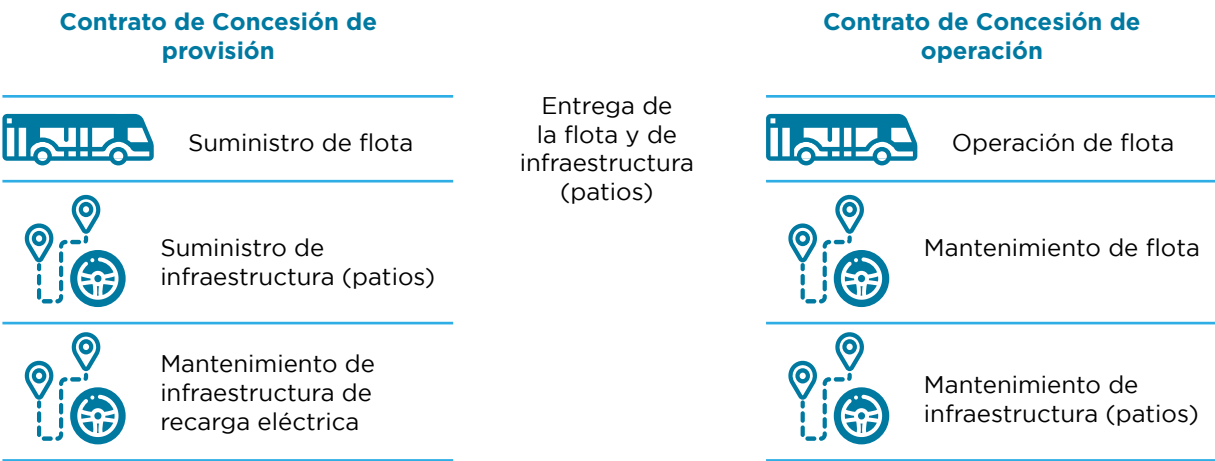
Actualmente, operan algunos buses eléctricos, con los que se esperan recolectar datos de su operación y costos, como la velocidad y rendimiento de la batería y contribuir así con la Dirección General de Eficiencia Energética del Ministerio de Minas para generar una guía al Gobierno Peruano en la implementación y consolidación de una estrategia para lograr la operación a gran escala de buses eléctricos en los sistemas de transporte público del país.

Existe la expectativa sobre un mercado para los buses eléctricos que pueden operar en los corredores complementarios donde se presta el servicio con un total de 739 buses de los cuáles el 15% están en proceso de ser reemplazados. Esto sin contar con los 3.429 buses por implementar en el Sistema Integrado de Transporte que se encuentra en reestructuración.

Bogotá

El esquema de contratación en Bogotá ha cambiado en los últimos dos años, dando un giro en la manera como se estructuraron los contratos de Concesión de sistemas de transporte. Las nuevas licitaciones contemplan un esquema de contratación en el que se separa la operación de la provisión de flota:

Figura 13
Esquema de contratación – renovación de flota SITP



Fuente: Análisis de documentos de licitación TMSA-LP-03-2020

En la presentación de las propuestas, los proponentes escogieron entre dos modalidades, una que se denomina acoplada que consiste en presentarse de manera conjunta, el concesionario de provisión y el concesionario de operación y una segunda modalidad que se denomina no acoplada en la que se presenta el concesionario de provisión independiente y en este caso el Ente Gestor designa el operador.

Este modelo de negocio que se planteó para el sistema de transporte en Bogotá, incluye una serie de beneficios para la adquisición de tecnología eléctrica:

Se tiene una mayor duración de la concesión, que como hemos visto a lo largo del documento y en especial para el caso de Lima, el tiempo de concesión resulta una limitación para la amortización de los costos de buses eléctricos. Cuando se presenta una propuesta con tecnología 100% eléctrica, el tiempo de concesión es por 15 años, mientras que las otras

tecnologías tienen una duración del contrato de concesión de 10 años.

Puntaje único para tecnología eléctrica, que se entiende como un incentivo en la calificación de las propuestas de la licitación, tanto para los proponentes en operación como para los proponentes de provisión.

Mayor Valor Presente Neto para tecnología eléctrica en la evaluación de las propuestas, con lo que se espera que se hagan más competitivas las tecnologías.

Mayor remuneración para tecnología eléctrica, este incentivo aplica para los dos proponentes, el de operación que tendrá cinco años de plazo adicional en el contrato de concesión y el proponente de provisión que además de los 5 años adicionales en el plazo del contrato de concesión, tendrá mayor inversión en infraestructura de soporte (patios) y mayor inversión en flota.

Bajo este esquema de contratación, desde

2019 se han adjudicado 1.485 buses para el sistema de tecnología 100% eléctrica.

Santiago

Para la licitación en curso (2021) en Santiago de Chile se ha introducido el nuevo esquema que consiste en la separación de la operación respecto a la adquisición de los buses. En este esquema, los operadores no requieren hacer una alta inversión inicial, sino que esa responsabilidad recae en los proveedores del material rodante. Además, este esquema cuenta con una serie de reglas, mecanismos, incentivos y premios para la compra de buses eléctrico, tales como contratos con plazos más largos cuando tienen flotas con más del 50% de buses eléctricos, mejor calificación por ofrecer mayor eficiencia energética y tecnología no contaminante, entre otros elementos. Lo anterior, ha permitido proyectar que un porcentaje significativo de los nuevos buses sean cero emisiones.

En Santiago de Chile, la adopción de buses eléctricos en el sistema ha avanzado significativamente. Entre 2017 y 2021, el sistema pasó de tener 3 pilotos de buses eléctricos a tener cerca de 800 buses eléctricos plenamente operativos (11% de la flota total de buses en la ciudad). Para lograr esto, el nuevo esquema recoge características del leasing operativo. Debido a que actualmente los buses eléctricos no cuentan con un mercado de usados establecido, el valor total del vehículo se amortiza durante el periodo financiado de 10 años y al final del periodo de repago la propiedad es transferida al operador.

Por otra parte, la presencia de los subsidios a la tarifa con que cuenta el sistema de transporte actúa como un ingreso mínimo garantizado, el cual el estado ha ofrecido como garantía a los inversionistas de los

buses eléctricos, que en un inicio han sido compañías de electricidad, y el cual es empleado para repagar el “leasing”. Lo anterior, se suma a la posibilidad contractual de que el operador entregue el derecho de un pago en particular a un tercero, significando en la práctica que el Estado transfiere los recursos por los nuevos buses eléctricos directamente a los inversionistas sin tener que pasar por los operadores, lo cual ha significado una reducción del riesgo de no pago.

Los mecanismos de contratación en Chile, han modificado ciertas condiciones en favor de la inclusión de tecnologías eléctricas a los sistemas de transporte de la ciudad. En primer lugar, se identificó la necesidad de comprar o renovar parte de la flota del sistema, ya sea por cambios operativos debido por ejemplo a un aumento de la longitud de las rutas o por una reducción de las velocidades o porque simplemente el ciclo de vida de la flota actual está llegando a su fin.

En los contratos creados entre el Gobierno y los operadores existen ciertas reglas que aseguran la estabilidad financiera a lo largo del tiempo. En caso que se presente alguna condición que afecte el equilibrio financiero del contrato, este debe ajustarse y el Concesionario puede negociar un aumento o disminución de su pago. Esta regla ha sido empleada durante la pandemia del COVID-19, asegurando la sustentabilidad del servicio. Por otra parte, existe una regla que regula un aumento de flota asociado a un aumento de kilómetros operativos. Si la adquisición de nueva flota genera un aumento que supera el 3% del pago mensual de la flota operativa anterior, el Estado debe cubrir la diferencia entre el costo de los nuevos y los viejos buses. En caso contrario, si se adquiere la nueva flota debido a la renovación de buses, pero no modifica los kilómetros operativos,

el Estado no hará ninguna inversión y el pago al Concesionario seguirá siendo el mismo. Con la primera regla mencionada, se introdujeron 200 buses eléctricos en los que el Estado asumió el incremento en los costos de capital asociados con la nueva tecnología.

Los nuevos contratos adoptados en Santiago de Chile contienen principalmente dos elementos que actúan como incentivos para la promoción de buses eléctricos en el sistema de transporte público. El primero es que la provisión de la flota es pagada directamente por el Estado a la compañía que proporciona los autobuses y el segundo especifica que, no importando la compañía que esté operando, los buses eléctricos permanecerán dentro del sistema; con esto se busca que se garantice la continuidad del servicio y que las empresas de energía, quienes hayan hecho las veces de inversionista, tengan la tranquilidad que la deuda será pagada, aunque eventualmente se cambie el operador y sin que dependa de la variación de la demanda transportada. Así, se reduce

el riesgo de la inversión y se asegura la continuidad del negocio; de esta manera los buses eléctricos, se pueden financiar en plazos mayores a los establecidos para los contratos de concesión de cada operador.

Ciudad de Guatemala

En el caso de Guatemala, con el apoyo del Banco, se están planteado 3 posibilidades de contratación para la futura incorporación de esta tecnología. En primer lugar, se plantea la posibilidad de realizar tres contratos separados para la provisión de flota, estaciones de carga e infraestructura y finalmente un contrato de suministro eléctrico. Una segunda opción consiste en tener dos contratos, uno de provisión de flota y otro que contemple las estaciones de carga y el suministro eléctrico. Un tercer modelo de contratación que se plantea es tener un contrato único donde el proponente consiga realizar la provisión de flota, las estaciones de carga y el suministro eléctrico en un solo contrato.

Tabla 27
Esquemas de contratación analizados para Guatemala

Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Contratos separados 1. Provisión de flota por arrendamiento, repuestos y mantenimiento especializado. 2. Estación de carga 3. Suministro eléctrico	2 contratos Contrato 1: Provisión de flota por arrendamiento, repuestos y mantenimiento especializado. Contrato 2: Estaciones de carga Suministro eléctrico	Contrato único Todos los componentes

Fuente: Análisis de implementación de flota eléctrica en la Línea 5 de Transmetro, en Guatemala. – Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

Tabla 28
Retos y beneficios de los modelos propuestos

Modelo	Beneficios	Retos
Contratos separados	Mejor control por parte de la Autoridad de transporte y mayor conocimiento de cada uno de los aspectos del sistema. Facilidad para exigir al Contratista que corresponda el cumplimiento del nivel de servicio deseado y de las condiciones pactadas.	Riesgo de interfaces por tratarse de proveedores y contratistas diferentes.
Dos contratos	Generador de energía puede construir la infraestructura de carga adecuada y de acuerdo con las características y especificaciones de la flota.	Ante un daño en la infraestructura, pueden presentarse conflictos en la responsabilidad que asume cada contratista.
Contrato único	Un solo contratista tendrá el control de la infraestructura, la flota y el suministro eléctrico y de esta manera los riesgos y la responsabilidad del cumplimiento del servicio será exigible a un solo proveedor.	La Autoridad de transporte pierde el conocimiento y control de lo que hay detrás de la prestación del servicio y del funcionamiento de cada componente.

6.

Sostenibilidad Económica



Como se ha mencionado en otros capítulos de este documento, la estructuración de un proyecto de buses eléctricos supone unos retos económicos y de sostenibilidad que deben ser estudiados ampliamente por los Gobiernos y Entidades participantes. Este capítulo presenta los análisis económicos y financieros aplicables a este tipo de proyectos.

6.1. Costo Total de la Propiedad (TCO)

El costo total de la propiedad (TCO por sus siglas en inglés) es una de las metodologías más empleadas para realizar comparaciones del costo total de adquisición, posesión y operación de vehículos durante su vida útil, entre diferentes tecnologías; es decir que, en un análisis de este tipo aquel con menor TCO será el menos costoso para el operador. Algunas características y ventajas de esta metodología son:

- Utilizada por gran parte de los operadores de autobuses para determinar el costo de poseer y operar autobuses durante un período de tiempo determinado.
- Sirve para determinar a que horizonte el TCO del bus eléctrico es igual al TCO de buses de referencia (diésel o gas de acuerdo a la ciudad) y así determinar cómo se tienen que modificar los tiempos de concesión (contratos).
- Permite determinar el mejor conjunto bus-batería-carga y así seleccionar la tecnología más adecuada según las necesidades operacionales (activos).
- Ayuda a identificar la necesidad de un financiamiento concesional.
- Sirve para determinar la necesidad de ajustar los cobros de energía, para así bajar los costos operativos y hacer el bus eléctrico más competitivo.

Por lo general la estimación del TCO para un bus eléctrico incluye tres componentes: el CAPEX (C_{CAPEX}), el OPEX (C_{OPEX}) y el costo por reemplazo de la batería (CREP).

Tabla 28
Retos y beneficios de los modelos propuestos

Componente	Fórmula	
C _{CAPEX}	$C_{CAPEX} = C_{bus} + C_{cha} - C_{sv}$	
	C_{bus} = Costo del bus	Incluye los costos asociados a la batería y el financiamiento requerido de ser necesario.
	C_{cha} = Costo del sistema de recarga	Incluye los costos del cargador, su instalación y la infraestructura requerida para conectarse a la red eléctrica; junto con su respectivo financiamiento de ser necesario.
	C_{sv} = Costo de salvamento al final de la vida útil	Corresponde a los costos que se puedan recibir sobre una posible venta de los activos, una vez finalice su vida útil. Por lo general son cero, aunque se han empezado a explorar alternativas, principalmente para un segundo uso de las baterías.

Componente	Fórmula	
C _{OPEX}	$C_{OPEX} = \sum_{j=0}^{-n} (D_T \times (C_E + C_M + C_P + C_{Adm})) \times (1 + d_{rate})^j$	
	D_T = Distancia total recorrida	Corresponde a los kilómetros recorridos por bus, de acuerdo con el modelo operacional definido.
	C_E = Costo del combustible	Equivalente al consumo de energía por cada bus. Es donde se logra obtener mayores ahorros con respecto a las tecnologías diésel y gas; más aún cuando se logran tarifas preferenciales con los distribuidores.
	C_M = Costo de mantenimiento	Incluye los costos asociados a lubricantes, neumáticos y mantenimiento de red de carga. Se logran ahorros con respecto a otras tecnologías debido a que se tienen menos partes mecánicas.
	C_P = Costo de personal operativo	Incluye el costo de los conductores y demás personal, junto con sus prestaciones sociales.
	C_{Adm} = Otros gastos administrativos	Incluye costos asociados a los kilómetros en vacío (dependen del modelo operativo), gastos administrativos, seguros e impuestos.
	d_{rate} = Tasa de descuento	Es el costo de capital que se aplica para determinar el valor presente de un pago futuro. Para este caso, se puede calcular en función del promedio del índice de precios al consumidor de los últimos tres años, más el riesgo del sector que corresponde al spread promedio ofrecido por la banca local para financiar a los operadores de transporte.
C _{REP}	j = Año de donde la operación es descontada	Año en el cual se está calculando el respectivo costo operacional.
	$C_{REP} = \sum_{j=0}^{-n} (C_{bat} + E_{bat}) \times (1 + D_{rate})^j$	
	C_{bat} = Costo de la batería	Expresado en términos de unidad de energía.
	E_{bat} = Capacidad de almacenamiento de la batería	Expresada en kilovatios hora. Dependerá de las necesidades operacionales del sistema y el esquema de carga definidos.
	d_{rate} = Tasa de descuento	Iguales condiciones que para el OPEX.
	j = Año de donde la operación es descontada	

Fuente: Análisis de implementación de flota eléctrica en la Línea 5 de Transmetro, en Guatemala. – Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

Como se señaló en la tabla anterior, el método TCO toma en cuenta el valor del dinero en el tiempo, es decir que trae los costos futuros al año cero por medio de la tasa de descuento del inversionista. Así mismo y aunque es ampliamente empleado debido a su simplicidad, replicabilidad y utilidad para realizar comparaciones entre

tecnologías que permiten tomar decisiones según el costo que representaría en su vida útil, el método no contempla los ingresos o la remuneración obtenida durante el periodo analizado, por lo cual no determina la eficiencia, rentabilidad, retorno y sostenibilidad de la inversión (Gatti 2013).

6.1.1. CAPEX

Como se ha mencionado, el costo de los activos asociados a la implementación de un proyecto de buses eléctricos depende de gran cantidad de variables. Dentro de los estudios que ha venido apoyando el Banco en la región se han desarrollado análisis TCO que permiten conocer en detalle los costos asociados a la adquisición e implementación de los buses eléctricos en varias ciudades. Por ejemplo, en el caso de Lima se realizaron cálculos bajo diferentes opciones:

Opción 1: Capacidad de la batería para un horizonte de 10 años.

Opción 2: Capacidad de la batería para un horizonte de 12 años.

Opción 3: Capacidad de la batería para un

horizonte de 12 años, pero reemplazando la batería en el año 6. Esto implica una batería de menor capacidad que requiere cargas durante el día.

Opción 4: Capacidad de la batería para un horizonte de 14 años, pero reemplazando la batería en el año 7. Esto implica una batería de menor capacidad que requiere cargas durante el día.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos dentro de los cuales se incluyeron análisis para buses diésel y Gas Natural, con el ánimo de tener datos comparativos. Dentro de esta no se ve reflejado el costo asociado al cambio de la batería para las opciones 3 y 4, los cuales se estiman que para el año 6 sería de 321 USD/kWh y en el año 7 de 305 USD/kWh.

Tabla 30
Costo de Capital de buses convenciones y eléctrico en dólares para Lima (2019)

Capex de los vehículos		Buses CI		Oferta promedio BE			
Costos del bus USD		Diésel	Gas	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4
Chasis		51,480	71,190	182,115	182,115	182,115	182,115
Carrocería		48,400	62,150				
Batería				104,880	126,730	65,550	78,660
Cargador				10,094	10,094	10,094	10,094
Instalación sistema de carga				32,294	32,294	32,294	32,294
Costo total sin impuestos	USD	99,880	133,340	329,383	351,233	290,053	303,163
Ad Valoren (arancel)	0%	-	-	-	-	-	-
Impuesto general a las ventas IGV	16%	15,980.80	21,334	52,701	56,197	46,408	48,506
Promoción minucipal	2%	1,997.60	2,667	6,588	7,025	5,801	6,063
Impuesto selectico al consumo (ISC)	0%	-	-	-	-	-	-
ISC buses eléctricos importados	0%	-	-	-	-	-	-
Total impuestos		17,978	59,289	59,289	63,222	52,209	54,569
Costo total de bus	USD	117,858	157,341	388,672	414,455	342,262	357,732

Fuente: Costos y tarifas de remuneración por vehículo y por kilómetro, para vehículos eléctricos de la flota Troncal y No troncal de la Fase III del Sistema Integrado de Transporte Publico SITP – Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

Otro caso es el de Buenos Aires, en donde los análisis se desarrollaron bajo 4 opciones o escenarios diferentes:

Opción 1: Capacidad de la batería para un horizonte de 10 años con recarga lenta.

Opción 2: Capacidad de la batería para un horizonte de 10 años con recarga rápida.

Opción 3: Capacidad de la batería para un horizonte de 12 años con carga lenta.

Opción 4: Capacidad de la batería para un horizonte de 12 años con recarga rápida, pero reemplazando la batería en el año 6.

Bajo estas consideraciones se obtienen costos de capital que se caracterizan, al igual que en Lima, por ser considerablemente altos en comparación con las tecnologías Diésel y Gas Natural. Así mismo se identifica una disminución de los mismo cuando se incluye el recambio de la batería, y para este caso, al utilizar una carga rápida. En términos comparativos para los dos países los costos del vehículo y batería son similares, encontrando algunas diferencias relacionadas con los costos de cargadores, instalación del sistema de recarga e impuestos, que están ligados directamente con condiciones específicas de las normas y mercados en cada país.

Tabla 31

Costo de Capital de buses diésel y eléctrico en dólares para Buenos Aires

Capex de los vehículos (USD)	Diésel	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Horizonte		10	10	12	12
Tipo de recarga		Lenta	Rápida	Lenta	Rápida
Chasis y carrocería	115,000	184,493	184,493	184,493	184,493
Batería		101,500	70,000	105,000	52,500
Cargador		6,288	6,367	6,288	6,367
Instalación sistema de recarga		19,172	19,061	19,172	19,061
Costo total sin impuestos	115,000	311,453	279,921	314,953	262,421
Arancel	incluido	-	-	-	-
IVA	12,075	32,075	29,392	33,070	27,554
Costo total de la inversión	127,075	127,075	309,312	348,023	289,975

Fuente: Diseño de estrategias y mecanismos de financiación para buses eléctricos en Buenos Aires, Argentina. - Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

6.1.2. OPEX

El OPEX se calcula en función de los kilómetros recorridos por los autobuses e incluye el costo de combustible del bus, determinado por su rendimiento y consumo específico de combustible, y los costos de

mantenimiento, salarios, administración e impuestos como al patrimonio y de renta. En los estudios realizados para Lima, Buenos Aires y Bogotá se realizó un análisis minucioso de cada una de las

variables que componen este costo, de tal forma que se pudiera establecer si los ahorros en términos operativos de un bus eléctrico, son suficientes para compensar su alto costo de capital y en que horizonte de tiempo. Así mismo, con estos análisis

se logra identificar que variables son mas sensibles respecto del OPEX total, para así mismo ajustarlas de tal forma que los proyectos sean sostenibles financieramente.

Tabla 32
Costo de Operación consolidado para Lima

Moneda (M)		Costo de operación en USD		
Tecnología		Diésel	Gas	Eléctrico
Unidad del combustible (UC)		Galones	m ³	kWh
Recorrido anual	Km		56,784	
Rendimiento	km/UC	7.50	1.50	0.95
Costo del combustible	M/UC	3.49	0.40	0.08
Mantenimiento	M/km	0.21	0.32	0.11
Matto infra. Recarga	M/km			0.01
Lubricantes	M/km	0.02	0.04	0.01
Neumáticos	M/km	0.02	0.02	0.02
Personal operativo	M/km	0.49	0.52	0.47
Seguro (todo R y Soat)	% Capex bus	1.40%	1.40%	2.20%

Fuente: Análisis y Diseño de Modelos de Negocio y Mecanismos de Financiación para Buses Eléctricos en Lima. - Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

Tabla 33
Costo de Operación consolidado para Buenos Aires

Tecnología		Diésel	Eléctrico
Unidad del combustible (UC)		Litro	kWh
Eficiencia del bus	km/UC	1.95	0.9
Costo de combustible	US\$/UC	0.82	0.12
Mantenimiento	US\$/km	0.18	0.09
Lubricantes	US\$/km	0.01	0.002
Neumáticos	US\$/km	0.03	0.03
Engrase y Lavado	US\$/km	0.02	0.02
Salarios personal	US\$/km	1.02	0.98
Coeficiente valor asegurado	%	1.50	2.50
Mantenimiento sistema de recarga	% del costo	N/A	2.00

Fuente: Diseño de estrategias y mecanismos de financiación para buses eléctricos en Buenos Aires, Argentina. - Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

Tabla 34

Costo Operativo por Kilómetro para Bogotá en diferentes tipologías

Tipología del bus		Padrón dual	Padrón zonal	Busetón	Buseta
Kilómetros de recorridos al año	km	67,538.39	65,767.90	66,065.44	66,637.93
Combustibles	CC	390.73	412.13	345.76	322.99
Consumo lubricantes de motor	CLM	-	-	-	-
Consumo lubricantes de transmisión	CLT	10.84	10.84	10.84	6.77
Consumo lubricantes diferencial	CLD	18.56	18.56	18.56	17.67
Filtros y refrigerante	CFR	0.66	0.66	0.66	0.53
Consumo llantas, neumáticos y protectores	CN				
Reencauche	CR	98.49	98.25	71.23	63.00
Monta llantas (pinchadas)	CM				
Mantenimiento	CMNTO	580.51	586.42	515.97	441.14
Salario personal mantenimiento	CPMNTO	52.50	53.69	40.23	36.06
Mantenimiento de Infr. recarga	REC	50.07	59.29	59.29	58.78
Salario conductores	CCOND	827.39	1,060.82	978.28	913.19
Salario supervisores	CSPV				
Servicio estación	CSE	86.37	95.31	84.67	83.68
Lavado diario	CLD				
Costos fijos	Cfijos	315.77	-	-	-
Costo total	Ctotal	2,431.89	2,396.23	2,125.50	1,943.82

Fuente: Costos y tarifas de remuneración por vehículo y por kilómetro, para vehículos eléctricos de la flota Troncal y No troncal de la Fase III del Sistema Integrado de Transporte Público SITP. – Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

Los resultados obtenidos refuerzan la premisa que los buses eléctricos tienen unos costos operativos más bajos que las demás tecnologías, lo cual se refleja principalmente en los costos de combustible y mantenimiento (aproximadamente la mitad que un bus diésel). Sólo el costo de los seguros y el mantenimiento de la infraestructura de recarga presentan sobrecostos, en el primer caso debido al alto costo de los vehículos y la incertidumbre que existe sobre la tecnología,; mientras en el segundo porque las demás tecnologías no requieren infraestructuras de abastecimiento tan complejas y que requieran grandes mantenimientos (por lo general viene cargado dentro del costo del combustible).

6.2.

Resultado del TCO

Los análisis de TCO en proyectos de buses en LAC muestran resultados diferentes y particulares en cada uno de los proyectos. Para el caso de Lima, utilizando una tasa de descuento del 10,23%, bajo los escenarios planteados e incorporando en algunos de ellos la variable financiamiento, en las condiciones que ofrece el mercado, se obtienen los siguientes resultados y conclusiones.

Figura 15
Análisis TCO para diferentes escenarios en Lima

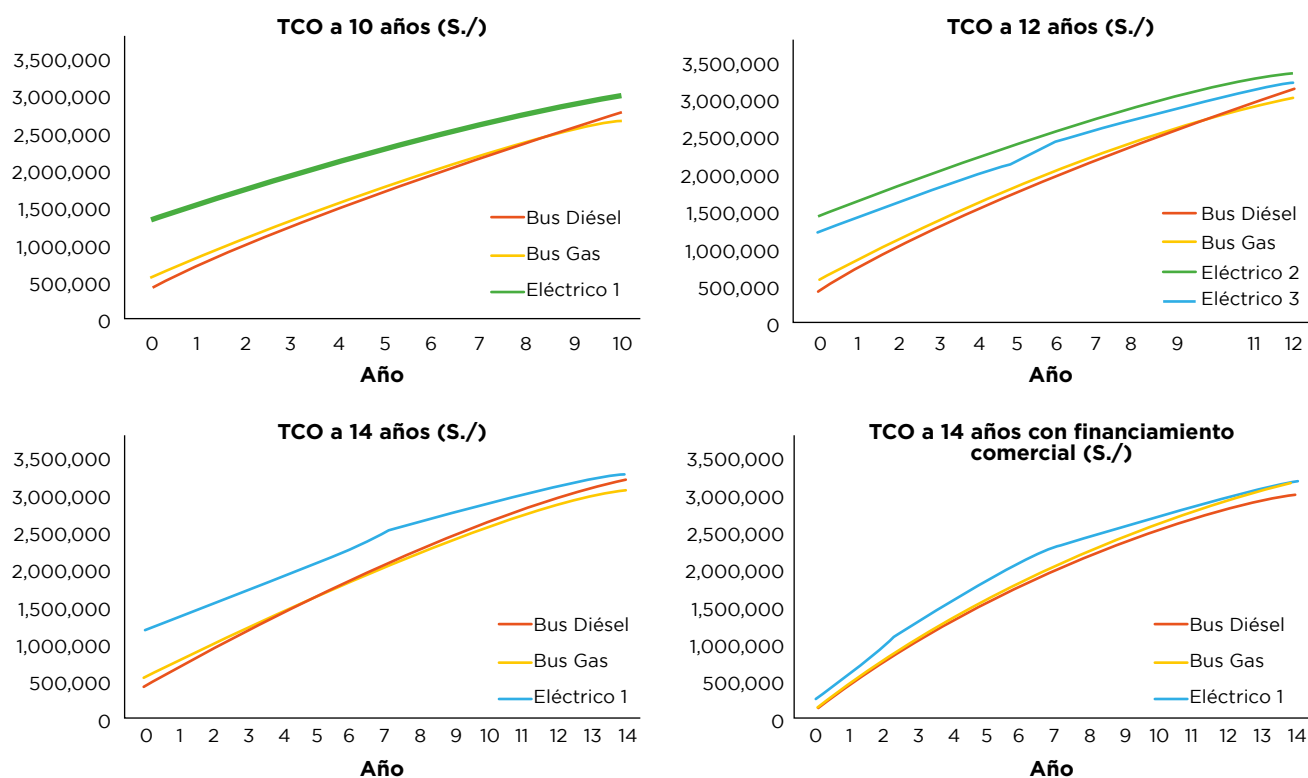


Figura 16
Resultado del TCO aplicando financiamiento en Lima

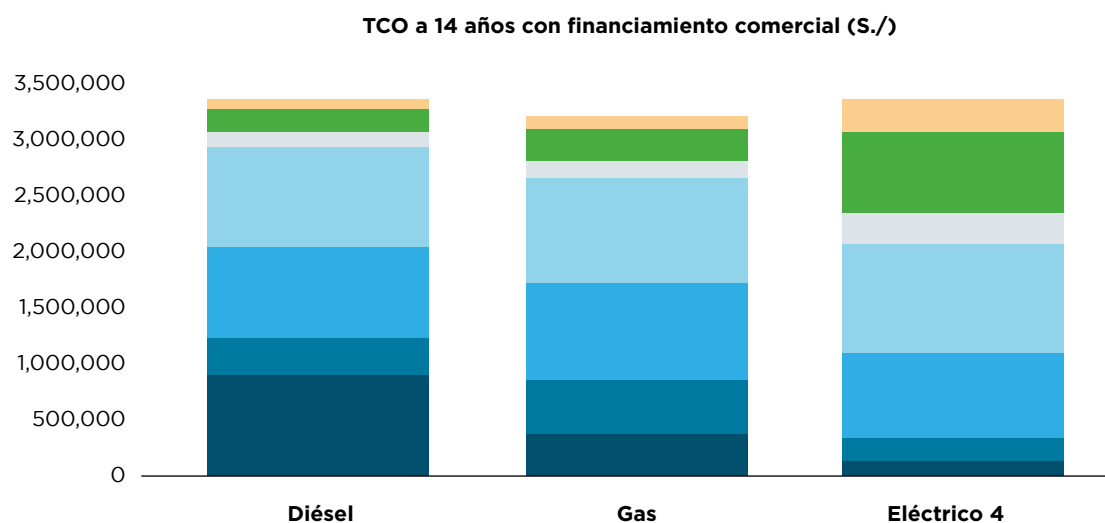
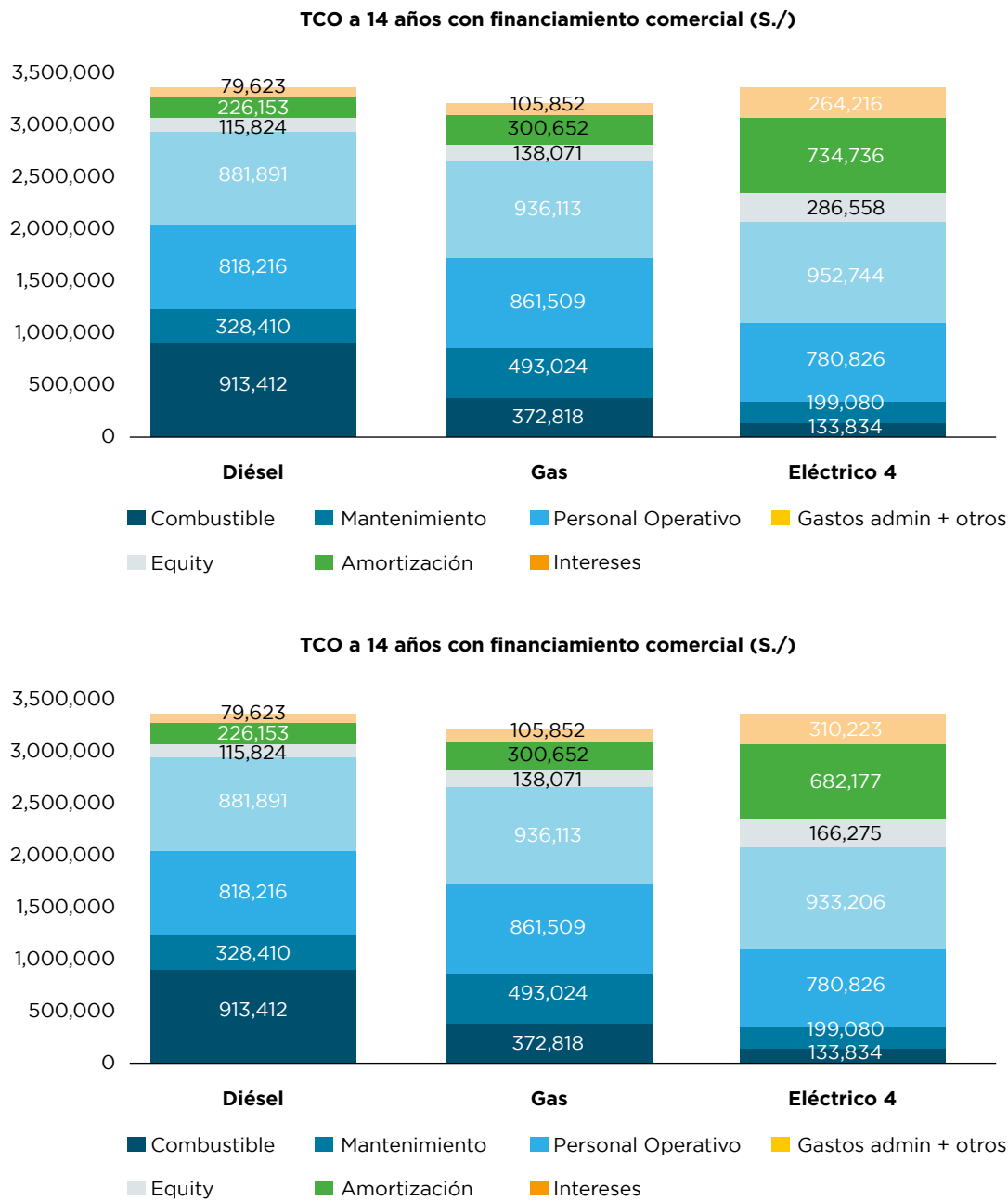


Figura 16
Resultado del TCO aplicando financiamiento en Lima



Fuente: Análisis y Diseño de Modelos de Negocio y Mecanismos de Financiación para Buses Eléctricos en Lima, Perú. - Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

A pesar que el TCO de las tecnologías convencionales y la eléctrica se hacen más cercanos en el tiempo, producto de los bajos costos de operación del bus eléctrico, los periodos de análisis entre 10 y 12 años no son suficientes para que la tecnología eléctrica sea competitiva.

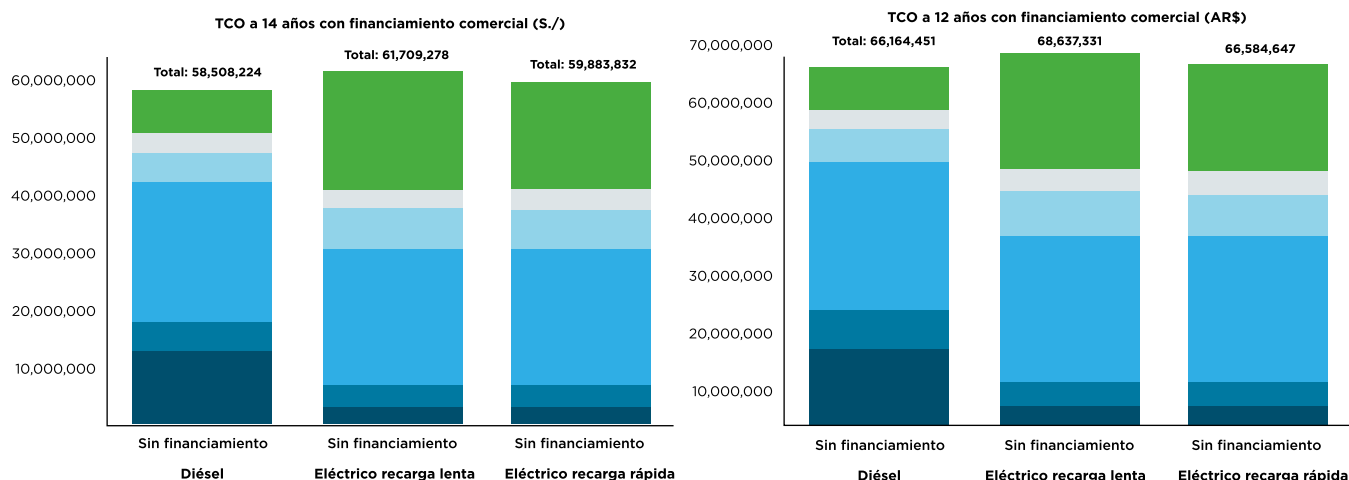
Para que el TCO del bus eléctrico sea comparable con los buses convencionales, se requiere, no solo de ampliar el horizonte operacional del bus eléctrico hasta 14 años sino también tener flexibilidad para poder realizar al menos una recarga a la batería durante el día, lo cual se traduce adicionalmente en una disminución del CAPEX.

Aunque las consideraciones de financiamiento actual hacen que los costos entre el bus eléctrico y el diésel sean

comparativos, se requieren alternativas de financiamiento, inclusive preferenciales para disminuir su costo, para que la tecnología sea competitiva con los bajos precios del combustible de los buses con tecnología a gas. Para el caso específico se estimó que el financiamiento preferencial debía ser con una tasa del 7% EA, plazo 12 años, 90% porcentaje de deuda y 36 meses periodo de gracia.

Para el caso de Buenos Aires se utilizó una tasa de descuento de 6,55%, una tasa de cambio AR\$/USD de 60,4, un porcentaje de deuda del 80% y una tasa de interés del 17% EA, obteniendo los siguientes resultados y conclusiones para los escenarios planteados.

Figura 16
Resultado del TCO aplicando financiamiento en Lima



El TCO del vehículo eléctrico de recarga rápida siempre es menor que el del vehículo de recarga lenta; sin embargo, al compararlos con el vehículo diésel se aprecia que en todos los escenarios este último representa la mejor opción económica.

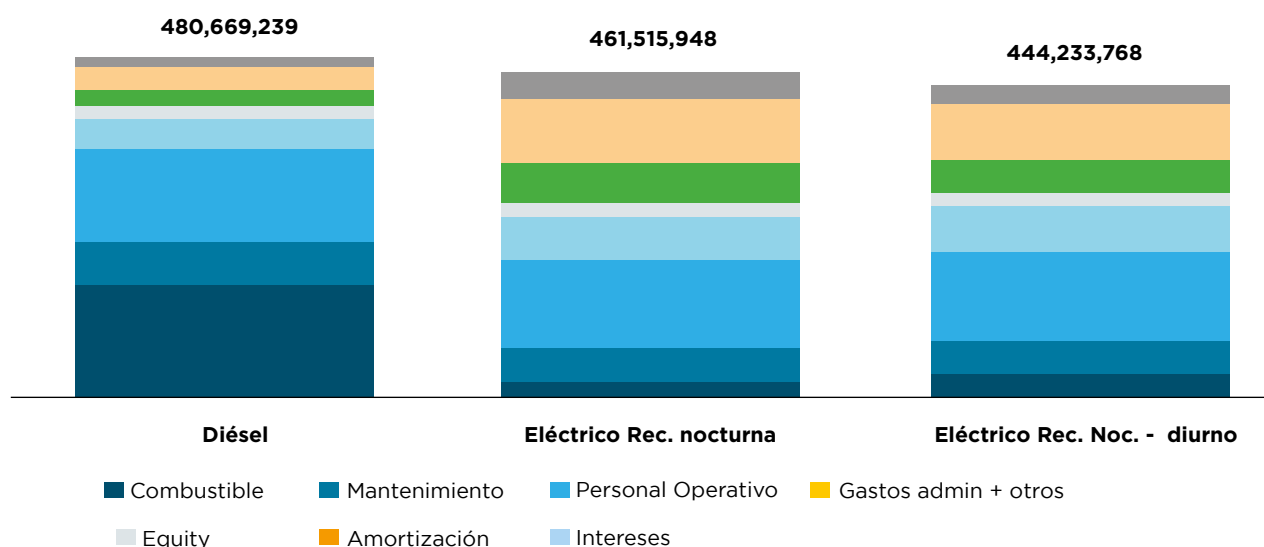
El diferencial mas bajo entre la tecnología eléctrica y diésel se da en el escenario de 12 años sin financiación con un gap de AR\$420.196 o US\$6.957; lo cual podría llegar a ser mitigable con mejores condiciones comerciales.

Aunque los resultados del análisis para los horizontes de 10 y 12 años demostraron que sin intervención alguna el TCO del vehículo diésel es menor al eléctrico; al hacer análisis de sensibilidad con las tarifas de energía eléctricas

disponibles, se estima que algunos incentivos podrían viabilizar la tecnología e implementación.

Aunque estos análisis particulares arrojaron resultados menos competitivos para la tecnología eléctricas, los cuales pueden llegar a mitigarse con ajustes en las variables y parámetros definidos para la operación; otro caso apoyado también por el Banco evidenció unas condiciones totalmente diferentes. En Costa Rica el análisis TCO con un horizonte de 14 años, una tasa de descuento del 11,26%, tasa de interés del 9,5%, porcentaje de deuda del 70% y periodo de gracia de 6 meses, arrojó unas condiciones totalmente favorables para el bus eléctrico, principalmente por una reducción a favor de esta del 27% para los costos de mantenimiento y del 80% para los costos de combustible.

Figura 18
Resultado del TCO escenario favorable en Costa Rica



Fuente: Modelos de negocio y Mecanismos de financiación para la masificación de buses eléctricos en la ciudad de San José, Costa Rica. - Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

Algunas conclusiones respecto de los análisis TCO:

Los CAPEX más altos de los buses eléctricos están asociados con el precio de las baterías y la necesidad de contar con una infraestructura de carga específica, tal y como se identificó en el capítulo 5.

Los costos operativos más bajos están asociados con el ahorro en el consumo de energía más eficiente y un mantenimiento reducido.

El TCO es altamente sensible al costo de la batería, el cual puede ajustarse en detalle con una correcta relación bus – ruta, de tal forma que se logre una optimización en el almacenamiento de energía. Así mismo, algunas experiencias han demostrado que se logra una mayor competitividad en ciudades grandes con largas distancias, debido al consumo energético.

En la región aún existen condiciones que desfavorecen la tecnología eléctrica: i) subsidios directos o indirectos a los combustibles fósiles; ii) altas tarifas de importación; iii) precios de la electricidad demasiado altos; iv) malas condiciones de financiamiento por la incertidumbre que genera la tecnología, v) ausencia de impuestos específicos a la generación de CO₂.

Teniendo en cuenta que el costo de capital del bus eléctrico con el pasar del tiempo y la evolución de la tecnología ha venido disminuyendo rápidamente, es probable que en el corto plazo se logren TCO mucho más competitivos.

El TCO depende del escenario bajo el cual se calcule, en donde el tiempo es una de las variables determinantes. Lograr un adecuado equilibrio entre el tiempo, financiación y vida útil del bus es fundamental para lograr modelos de negocio exitosos.

TIR - VPN

Si bien el TCO sirve para comparar tecnologías, la conclusión final sobre la rentabilidad y viabilidad de un proyecto debe incluir remuneración e ingresos. Por lo general, para el análisis de la viabilidad económica se emplea el método de flujo de caja en donde se mide el impacto de las variables consideradas en el TCO en la remuneración de los operadores de bus a través de indicadores como la Tasa Interna de Retorno (TIR), el Valor Presente Neto del proyecto (VPN). Otros indicadores usados pueden ser el retorno de los recursos propios o equity (ROE) y el retorno de la inversión en años.

$$VPN = \sum_{n=0}^N (\text{Flujo de caja } n) / (1+d)^n = 0 \text{ ; donde } d = \text{tasa de descuento} = \text{TIR}$$

El valor presente neto (VPN) permite determinar si los flujos futuros del proyecto (actualizados mediante una tasa de descuento) permiten repagar la inversión y si el valor obtenido, el cual es el neto del proyecto, genera valor o no al inversionista. Por su parte, La tasa interna de retorno (TIR) es un indicador de la rentabilidad del proyecto definida como el promedio geométrico de los rendimientos futuros. Es la tasa bajo la cual el VPN es igual a 0. A mayor TIR mayor rentabilidad.

En los estudios apoyados en la región, se han desarrollado los análisis financieros para identificar la viabilidad del proyecto desde el punto de vista del inversionista. Estos análisis se hacen bajo diferentes escenarios, para identificar el mecanismo que ofrece mayor rentabilidad. En el caso de Lima se estudiaron escenarios con y sin financiación, para diferentes tecnologías y tipos de financiamiento, de manera que se pudieran comparar.

Tabla 35

Análisis obtenido en Lima bajo diferentes escenarios de Financiamiento

Resultado del Análisis sin Financiamiento			
Tecnología	Diésel	Gas	Eléctrico
Inversión inicial Cap. Propio (S./)	437,893	437,893	1,229,889
TIR	5.27 %	5.27 %	7.89%
VPN (S./)	-85,925	-85,925	155,285
Resultado del Análisis con Financiamiento			
Tecnología	Diésel	Gas	Eléctrico
Inversión inicial Cap. Propio (S./)	116,679	139,938	267,544
TIR	4.56%	17.29%	7.97%
VPN (S./)	46,999	108,490	-80,582
Resultado del Análisis con Financiamiento			
Tecnología	Diésel	Gas	Eléctrico
Inversión inicial Cap. Propio (S./)	116,679	139,938	147,251
TIR	4.56%	17.29%	20.01%
VPN (S./)	46,999	108,490	114,755

Fuente: Análisis y Diseño de Modelos de Negocio y Mecanismos de Financiación para Buses Eléctricos en Lima, Perú. - Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

Algunas conclusiones sobre los resultados obtenidos en el caso de Lima:

De las tres tecnologías y sin incluir financiamiento en el análisis, solo el bus a gas natural presenta resultados favorables desde el punto de vista del inversionista.

Bajo la estructura de financiamiento considerada (plazo de préstamo 6 años, 80% deuda, 10%EA tasa de interés y 6 meses de periodo de gracia), no se identifica mayor efecto en los indicadores de los buses diésel y eléctrico. Las condiciones de financiamiento favorecen el bus a gas natural.

Una de las razones para que los buses a gas natural resulten más favorables que las demás tecnologías, se debe principalmente

al costo del combustible. Aunque en el Perú, el gas natural vehicular no cuenta con subsidios, existe una oferta agresiva por parte de los proveedores debido a una gran disponibilidad del combustible.

El resultado de incluir financiamiento preferencial con 90% porcentaje de deuda, 10 años de plazo, 7% tasa de interés y 36 meses de periodo de gracia, no solo hace competitiva la tecnología eléctrica con relación al bus a gas natural, también aproxima la proporción de capital propio o depósito inicial.

Otro análisis de este tipo, fue el desarrollado en Bogotá, en donde se estudiaron diferentes tipologías y tecnologías con los siguientes resultados.

Tabla 36

Análisis obtenido en Bogotá bajo diferentes escenarios de tipologías

Padrón Dual

Indicadores eléctrico	
TIR	12.12%
VPN (COP)	46.04

Indicadores diésel	
TIR	10,93%
VPN	6.84

Busetón

Indicadores eléctrico	
TIR	8.31%
VPN (COP)	-36.46

Indicadores diésel	
TIR	-4,57%
VPN	-69.92

Padrón zonal

Indicadores eléctrico	
TIR	12.13%
VPN (COP)	46.89

Indicadores diésel	
TIR	11.04%
VPN	8.19

Buseta

Indicadores eléctrico	
TIR	6.69%
VPN (COP)	-52.18

Indicadores diésel	
TIR	-7.78%
VPN	-78.78

Fuente: Costos y tarifas de remuneración por vehículo y por kilómetro, para vehículos eléctricos de la flota Troncal y No troncal de la Fase III del Sistema Integrado de Transporte Público SITP. – Cooperación Técnica RG-T3078, BID.

7.

conclusiones y recomendaciones



7.1. Conclusiones

Este documento muestra que los buses eléctricos han empezado a ganar espacio no sólo en países asiáticos si no en la movilidad en América Latina y el Caribe. Se muestra que hay un interés real por mejorar las condiciones ambientales de las ciudades y por hacer realidad la implementación de sistemas de buses eléctricos en la región.

En América Latina y el Caribe, ciudades como Bogotá y Santiago, han jugado un rol muy importante en el liderazgo por adoptar esta tecnología para transporte público. El BID ha estado presente este proceso y ha sido crucial para lograr el éxito obtenido hasta el momento en la región.

Los distintos países y sistemas de transporte analizados presentan diferentes políticas y evidencias de esfuerzos realizados para lograr la transición hacia una movilidad sostenible. Estos esfuerzos se concentran principalmente en cambios en la normatividad y en generación de incentivos legales y tributarios que le permitan al país adoptar la nuevas tecnologías.

A pesar de reconocer los beneficios ambientales, operacionales y de prestación del servicio, persiste la identificación de barreras e incertidumbres que limitan la implementación y masificación de los buses eléctricos en el mundo y en LAC. Algunas de ellas son: Incertidumbre sobre la potencia y autonomía de los buses para rutas con altas pendientes; alto costo de adquisición inicial; alto costos de la infraestructura de carga, incluyendo adecuación de la red eléctrica; debilidad

institucional para la promoción y gestión integral de estas nuevas tecnologías; entre otros.

La identificación de estas barreras, supone retos importantes para las ciudades, para las autoridades, los operadores e incluso para los usuarios. Una de las estrategias más comunes para avanzar en la resolución de las incertidumbres y retos que suponen la operación de buses eléctricos, es la implementación de pruebas piloto que constituyen una valiosa estrategia para generar confianza en la tecnología y evaluar aquellos factores que presentan incertidumbre y que dependen en gran medida de las características propias de las ciudades, como su topografía, condición geográfica, su extensión y su modelo de operación del sistema de transporte.

En LAC existe una gran intención de promover el uso de buses eléctricos dentro del transporte público, por lo cual se han desarrollado con apoyo financiero y técnico del Banco, varios estudios, pilotos y pruebas con el fin de tener información real que permita una mejor estructuración de los proyectos. A pesar de estos esfuerzos, la puesta en marcha ha sido lenta en la región se encuentra atrasada en comparación con el resto del mundo. A la fecha, sólo en Chile y Colombia se ha logrado poner en funcionamiento una flota significativa de buses con esta tecnología.

En cuanto a los costos operativos de los buses eléctricos, los análisis que se muestran en el documento refuerzan la premisa que estos vehículos tienen unos costos operativos más bajos que las demás tecnologías, lo cual se refleja principalmente en los costos de combustible y mantenimiento (aproximadamente la mitad que un bus diésel). Sólo el costo de los seguros y el mantenimiento de la infraestructura de recarga presentan sobrecostos, en el

primer caso debido a que la tecnología no tiene la suficiente fuerza en el mercado y existen incertidumbres que son mitigadas con valores mas altos en las coberturas; mientras en el segundo porque las demás tecnologías no requieren infraestructuras de abastecimiento tan complejas y que requieran grandes mantenimientos.

7.2.

Recomendaciones

Aunque se insiste en la oportunidad que representan los buses eléctricos para contribuir a la mejora en la calidad del aire de las ciudades, por sí sólo el bus eléctrico no va a solucionar en su totalidad el problema de contaminación. Es necesario tener un apolítica de mejoramiento integral, que involucre no sólo los vehículos de transporte público. En ciudades como Bogotá, mediciones de la Secretaria Distrital de Movilidad demostraron que los vehículos de carga aportan el 43,6% de las emisiones de fuentes móviles; mientras el transporte público aporta el 23%, donde el sistema BRT que cuenta con vehículos más limpios (híbridos, gas y Euro VI), tan sólo produce el 9,8%.

Para continuar el proceso de consolidación de proyectos de movilidad urbana sostenible, es necesario

desarrollar hojas de ruta claras respecto a las políticas de largo plazo que puedan ofrecer certidumbre al sector privado y con las cuáles se puedan realizar inversiones, evaluación de avances y de impactos de estos proyectos de electrificación del transporte.

Si bien, los proyectos de movilidad eléctrica pueden entenderse como exclusivos del sector transporte, es importante que exista una coordinación interinstitucional con las entidades del sector de energía, no sólo autoridades si no también generadoras y comercializadores de energía. Además, las autoridades de hacienda y crédito público juegan un papel relevante para este tipo de proyectos, ya que son encargados de la financiación, de definir los incentivos, entre otros.

En este sentido, es importante realizar esfuerzos a nivel local, por entender la tecnología de buses eléctricos, impactos, requerimientos y su ciclo de vida y de esta manera identificar las necesidades institucionales, de financiamiento y legales de cada ciudad en específico.

Finalmente y con una perspectiva a futuro, los modelos de negocio para la implementación de buses eléctricos en el transporte público deberán ir evolucionando a medida que lo haga la tecnología, incluyendo posibles análisis asociados a alternativas que van surgiendo diferentes a las baterías convencionales. La clave en este sentido está en generar conocimiento y capacidades para afrontar los cambios, de tal forma que cualquier avance tecnológico se aproveche al máximo para viabilizar este tipo de proyectos.

