Sistemas de **transporte público** de **autobuses eléctricos** **en la región** de América Latina y el Caribe

Reporte de **estado del arte** y conceptos básicos

ONU programa para el medio ambiente

50 1972-2022

Contenidos

Antecedentes del documento

01. Introducción

02. Situación de transporte público eléctrico en América Latina y el Caribe

- Flotas en operación
- Proveedores sector electromovilidad en América Latina y el Caribe
- Modelos de implementación, inversión y contratación de la operación de búses eléctricos
- Marcos regulatorios por país

03. Componentes básicos de un proyecto de transporte público con búses eléctricos

- A. Autobuses eléctricos
- B. Baterías
- C. Infraestructura de recarga

04. Planeación

- A. Mapeo de actores y roles
- B. Estudio de mercado
- C. Planeación operativa y energética de la implementación de autobuses eléctricos

05. Operación

- A. Fase preoperativa
- B. Levantamiento de líneas base
- C. Cambios en la operación cotidiana
- D. Monitoreo de la operación
- E. Gestión de las baterías
- F. Segunda vida de las baterías
  - A. Interoperabilidad
  - B. Riesgos en la implementación de flotas de autobuses eléctricos

06. Mantenimiento

- A. Rutinas de mantenimiento preventivo
- B. Mantenimiento mayor y correctivo
- C. Neumáticos
- D. Mantenimiento de los sistemas de recarga

07. Impactos esperados y monitoreo

- A. Mejoramiento en la calidad del aire, ruido y salud
- B. Mejora en la calidad del servicio y recuperación del transporte público
- C. Reducción de la huella de carbono y desarrollo sostenible

08. Costo total de propiedad

- A. Costos de capital
- B. Costos de operación
- C. Costos de reemplazo
- D. Diferencias encontradas en el CTP de los autobuses eléctricos y otras tecnologías

09. Financiamiento y modelos de negocio

- A. Opciones de financiamiento
- B. Modelos de negocio de referencia

10. Proceso de implementación (adquisiciones y contratos necesarios)

- A. Adquisición o contratación e implementación de la flota de buses eléctricos, baterías e infraestructura de carga
- B. Ruta crítica de implementación

Referencias

Anexo

Glosario

Publicado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Marzo 2022.

Reconocimiento NoComercial Sin Obra Derivada CC BY - NC – ND

Esta publicación puede ser reproducida total o parcialmente y en cualquier forma para servicios educativos o no lucrativos sin el permiso especial del poseedor de los derechos de autor, siempre que el reconocimiento de la fuente se haga. PNUMA agradecería recibir una copia de cualquier publicación que utilice esta publicación como fuente.

No se podrá hacer uso de esta publicación para la reventa o cualquier otro propósito comercial sin permiso previo por escrito del PNUMA. Las solicitudes para tal permiso, con una declaración del propósito y el alcance de la reproducción, deben dirigirse al director, División de Comunicación, PNUMA, Oficina para América Latina y el Caribe, Edificio 103, Calle Alberto Tejada, Ciudad del Saber, Clayton, Panamá.

Descargo de responsabilidad.

La mención de una empresa o producto comercial en este documento no implica la aprobación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) o las y los autores. No se permite el uso de la información de este documento para publicidad o mercadeo. Los nombres y símbolos de marcas registradas se utilizan de manera editorial sin intención de infringir las leyes de marcas o derechos de autor. La presente publicación ha sido elaborada con el apoyo financiero de Euroclima+. Su contenido es responsabilidad exclusiva de la plataforma MOVE y no necesariamente refleja los puntos de vista del PNUMA y Euroclima+. El PNUMA no tiene responsabilidad sobre las acciones o posiciones verbales tomadas por estos, antes, durante o después de esta asociación. Las opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no reflejan necesariamente las opiniones del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Lamentamos cualquier error u omisión que se haya hecho involuntariamente

© Fotografías e ilustraciones según especificado.

Este documento puede citarse como: PNUMA (2022). Sistemas de transporte público de autobuses eléctricos en la región de América Latina y el Caribe. Reporte de estado del arte y conceptos básicos.

Con el apoyo de: PNUMA MOVE y financiadores.

Agradecimientos

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) desea agradecer a los autores principales y contribuyentes, así como a los revisores su contribución a la preparación de este informe.

Los autores y revisores han participado en el informe en sus capacidades individuales. Sus afiliaciones solo se mencionan con fines de identificación.

Autores principales
David Escalante Sanchez y María Fernanda Ortiz Carrascal.

Diseño y diagramación
Caludia Martínez y Maximiliano Rosete (Milian Editores)

Diseño de plataforma web
Javier Bianchet (PNUMA)

Recopilación y procesamiento de información
Un agradecimiento especial a: Curtis Boodoo, de la Universidad de Trinidad y Tobago y del Grupo de Trabajo de Movilidad Eléctrica en CARICOM; Félix Jacob Santiago, del Sistema de Transporte Eléctricos Lynda Holder, del Barbados Transport Board

Consultores MOVE (PNUMA)
María José Ventura (Costa Rica), Alexander Fragueiro (Panamá), Álvaro Guzmán (Ecuador), Carlos Germán Meza (Nicaragua), Jaime Alberto Morales (Guatemala), José Javier Sosa Martínez (Paraguay), Leonardo Iannuzzi (Argentina), Nicolás Castroman (Uruguay), Pedro Scarpineli (Argentina), Gustavo Jimenez Vera (México), Juanita Concha Rivera (Colombia), Ronald Panameño Segura (El Salvador), Ana Davila Gavilanes (Ecuador), Francisco Ortega Pichardo (Rep. Dominicana)

Revisores internos
Gustavo Máñez Gomis, Jone Orbea Otazua, Mercedes García Fariña, Germán Daniel Díaz Rivas, Juan Camilo Ramirez Arjona, Juan Pablo Benitez Gonzalez, Carlos Mir Cárdenas, Juan Luis Pardo Gonzalez y Luis Felipe Quirama.

Lanzamiento y prensa
Sofia Arocha y Germán Daniel Díaz (PNUMA)

Gracias también a La Unión Europea, en particular al Programa EUROCLIMA+ por apoyar la creación de este informe.

Para más información acerca de la iniciativa MOVE visite el sitio: https://movelatam.org/

UNEP: PO – 2500259183; JO -149578



Fuente: Autores
David Escalante Sánchez | **María Fernanda** Ortiz Carrascal
FECHA 02/07/2021

Antecedentes del documento:

El objetivo del "Reporte del estado del arte y conceptos básicos de los sistemas de transporte público de autobuses eléctricos en la región de América Latina y el Caribe " será presentar los conceptos básicos, elementos, ideas principales, así como referencias a casos y estudios relevantes entorno de la implementación de sistemas de transporte público de autobuses eléctricos en la región de América Latina y el Caribe; con el propósito de apoyar la creación de conocimiento y toma de decisiones en México.

En este sentido, debe entenderse que el documento estudia en particular el fenómeno de reciente inclusión de flotas de autobuses eléctricos a baterías, en los sistemas de transporte público colectivo a nivel mundial. Se prevé que el concepto de electromovilidad y las tecnologías disponibles cambien rápidamente, y por ello se recomienda la actualización de este documento, así como de todo tipo de documentos de referencia sobre éste y otros procesos de transición tecnológica en función de los cambios de mercado y avances tecnológicos.

En el momento en el que se encuentra la electromovilidad en América Latina y el Caribe, aun son necesarias muchas acciones que detonen la aparición de este tipo de tecnologías en la mayoría de los sistemas de transporte colectivo, garantizando una sostenibilidad técnica, financiera y social, que permita posteriormente iniciar un proceso de masificación de esta. Es por ello por lo que la estructura y contenidos de este reporte, buscan brindar elementos de contexto y bases sólidas de comprensión del fenómeno que permita a tomadores de decisión y planeadores tener una orientación sobre el proceso de diseño e implementación de nuevos sistemas.

Adicionalmente, hoy en día existe una gran cantidad de documentos y fuentes de información de gran valor que abordan cada uno de los subtemas específicos de la electromovilidad y en específico de las flotas de autobuses eléctricos. Por ello este documento buscará compartir una estructura clara y a la vez amplia del proceso que enfrentarán los planeadores y tomadores de decisión, guiándolos hacia referencias útiles que les permitirán profundizar en los aspectos necesarios.

Este documento es propiedad del Programa de las Naciones Unidad para el Medio Ambiente (PNUMA). A su vez, los contenidos de este documento no reflejan necesariamente la opinión del del PNUMA sobre los temas tratados.



Primera flota de autobuses eléctricos de Medellín, Colombia.
Fuente: Autores

Sobre los autores

David Escalante **Sánchez**

Es Ingeniero de Transporte enfocado en planeación e implementación de proyectos de movilidad urbana, con experiencia en México, Brasil, Argentina, Colombia, Perú, República Dominicana, Guatemala y Panamá. En su experiencia, destacan su trabajo en la planeación y expanWsión de Metrobús de la Ciudad de México y como consultor de planeación de transporte en LOGIT Engenharia Consultiva en Brasil. Tiene experiencia en los sectores público, privado y no gubernamental. Recientemente ha desarrollado diversos estudios y proyectos para la implementación de sistemas de autobuses eléctricos en Latinoamérica.

María Fernanda **Ortiz Carrascal**

Ingeniera civil, MSc en Ingeniería de Transporte y MSc en Ciudades Inteligentes y Análisis Urbano, con más de diez años de experiencia en planeación e implementación de proyectos de transporte urbano. Como parte del gobierno local de Bogotá, participó en la estructuración de la Primera Línea del Metro, la reestructuración de los contratos de concesión del Sistema Integrado de Transporte Público y la estructuración e implementación de la renovación de la flota troncal y de la renovación de flota zonal a tecnologías de cero y bajas emisiones, proceso en el cual se adquirieron 1,485 buses eléctricos para la ciudad. También fue consultora por 5 años para la firma Steer y recientemente asesora varios proyectos de movilidad eléctrica en América Latina.

01

Introducción

El transporte público eléctrico es tendencia en todo el mundo, y en todas las modalidades desde vehículos pesados de transporte de pasajeros hasta las bicis eléctricas, patinetes y los vehículos que conforman la micromovilidad.

A nivel mundial están operando más de 513,000 autobuses eléctricos de este tipo (McKerracher Colin, Izadi-Najafabadi Ali, Aleksandra O'Donovan, 2020). China sigue teniendo el liderazgo, donde operan alrededor del 95% de los buses eléctricos; seguida por Europa con un registro de 1,900 autobuses en 2019, haciendo un total de 4,500. Estados Unidos de América y Canadá tenían alrededor de 2,200 e India tenía un total de 800 en 2019.

América Latina y el Caribe es una de las regiones con mayor crecimiento de buses eléctricos con un crecimiento de 3.5 veces de 2018 a 2019 (McKerracher Colin, Izadi-Najafabadi Ali, Aleksandra O'Donovan, 2020). Actualmente operan 2,306 autobuses (LABMOB, 2021), tanto a baterías como trolebuses y se deben añadir los 1,002 autobuses contratados que recientemente completó la ciudad de Bogotá (enero 2021). Estos vehículos operan principalmente en rutas urbanas y son principalmente padrones de 12m.

El 95% de estos vehículos en el mundo son a batería y trolebuses, aunque comienzan a aumentar el número de casos de prueba y operación piloto de buses de hidrógeno, en lo que destaca el caso chino nuevamente, en donde se han puesto a prueba 4,000 vehículos de este tipo recientemente.

Dados los beneficios indiscutibles de la movilidad eléctrica y para continuar en la senda de crecimiento de esta tecnología en los sistemas de transporte público de América Latina y el Caribe es importante tener en cuenta que este tipo de proyectos tienen desafíos y oportunidades particulares que implican soluciones innovadoras y un trabajo coordinado y articulado entre 3 sectores fundamentales; transporte, energía y medio ambiental.

También, a diferencia de las tecnologías de buses más comunes, un proyecto de autobuses eléctricos tiene 3 componentes esenciales para ser exitosos; los vehículos, las baterías y la infraestructura de recarga. En este documento se explican los aspectos técnicos, operativos, financieros y estratégicos que se deben considerar para mantener los 3 componentes alineados durante toda la vida del proyecto, dentro de los cuales se

destacan los procesos de planeación, prueba y monitoreo de la operación, así como las particularidades financieras de esta tecnología.

Por otra parte, este reporte expone cómo las necesidades adicionales de la movilidad eléctrica en comparación con los proyectos tradicionales de transporte han generado la participación de un mayor número de actores y de diversos sectores, como el de la energía. Esto y los retos financieros recientes que enfrentan los sistemas de transporte público de la región han llevado a las ciudades a innovar en la implementación de nuevos modelos de negocio que facilitan a su vez acceder a numerosos mecanismos de financiación.

El financiamiento, además, es un tema clave para el éxito de la movilidad eléctrica y aquí se plantean las estrategias y consideraciones más relevantes. Dentro de las principales recomendaciones se sugiere desarrollar fuentes sólidas y estables de fondeo y financiación para que el proyecto sea sostenible en el tiempo y los actores que le apuesten a la movilidad eléctrica en las ciudades puedan tener las garantías e incentivos necesarios para prestar una excelente calidad del servicio a los usuarios.

Los modelos de negocio, las estrategias de financiación y las de adquisición repercuten en la ruta crítica de los proyectos y por lo tanto en sus plazos de ejecución. Por esto, es importante tener en cuenta cuáles son las principales actividades de esta ruta crítica, cuáles son las opciones que se pueden encontrar en el camino y las principales consideraciones para tomar las decisiones que lleven a tener el mejor proyecto para el contexto de cada ciudad.

De igual forma, es fundamental conocer los impactos esperados de un proyecto de autobuses eléctricos en una ciudad, en los ámbitos ambientales, sociales, de salud y de calidad del servicio del sistema de transporte público. De esta manera, se pueden tener en cuenta al momento de comparar los autobuses eléctricos con otras tecnologías disponibles en el mercado y hacer un análisis beneficio-costo riguroso.

En conclusión, el presente documento tiene como principal objetivo suministrar definiciones, herramientas y recomendaciones que permitan entender las particularidades y complejidades de un proyecto de autobuses eléctricos y se puedan tomar decisiones conociendo cuáles pueden ser las implicaciones, los retos y las opciones para superarlos.

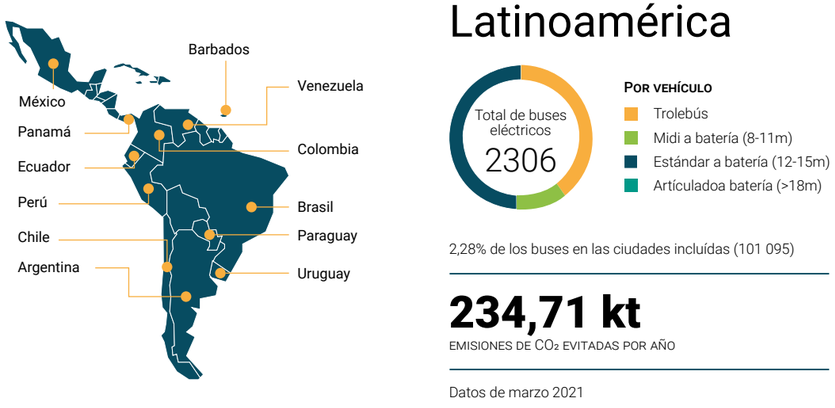
02

Situación del transporte público eléctrico en América Latina y el Caribe

En América Latina y el Caribe (ALyC), la aparición de flotas de autobuses eléctricos es un fenómeno reciente y que se modifica rápidamente. Éste recibe gran interés de autoridades, transportistas y otras instituciones, y existen diversas iniciativas dedicadas a diseminar información actualizada sobre el tema.

De acuerdo con el “E-bus radar”, 2,306 autobuses eléctricos se encuentran operando en ALyC considerando trolebuses y autobuses de baterías (LABMOB, 2021). Esta herramienta puede ser consultada para actualizar y conocer los detalles de las flotas de buses eléctricos desplegados en la región (Figura 1).

Figura 1 Buses eléctricos en América Latina



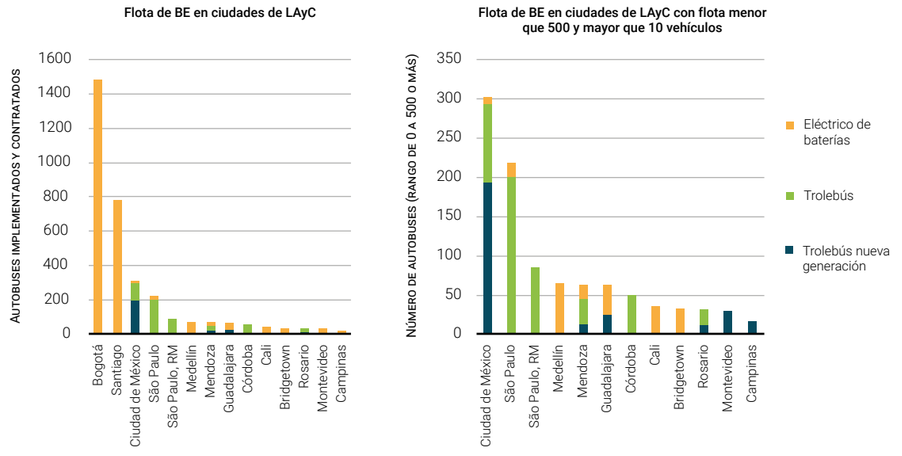
Fuente: LABMOB, 2021, consultado el 25 de mayo de 2021; esta información considera vehículos implementados hasta el mes de marzo de 2021, y no considera aun flotas contratadas o adquiridas, no implementadas.

En la Figura 2 y Tabla 1 se muestran las ciudades en América Latina y el Caribe (ALyC) con flotas de autobuses eléctricos, de acuerdo con el tamaño de la flota y la tecnología del vehículo.

Actualmente, se han realizado pruebas demostrativas en la mayor parte de los países de la región, y algunos más han implementado sus primeras flotas, a veces consideradas de prueba. Sin embargo, llama la atención que ya se encuentran en operación las primeras flotas "masivas" de autobuses eléctricos de baterías en 2 ciudades de la región: Santiago de Chile y Bogotá, mientras que las ciudades de Sao Paulo y Ciudad de México tienen flotas de vehículos mayores a los 300 vehículos considerando trolebuses antiguos, trolebuses de nueva generación con baterías y una introducción inicial de autobuses de baterías.

Adicionalmente, existen una diversa cantidad de autobuses desplegados en flotas de entre 10 y 64 vehículos en la región. También, puede apreciarse que en ALyC aún existe una importante influencia de los sistemas de trolebuses implantados varias décadas atrás, y que hoy presentan una oportunidad estratégica para los gobiernos locales en sus esfuerzos por impulsar los sistemas de movilidad eléctrica.

Figura 2 Flotas de autobuses eléctricos en operación y contratados, por tipo de tecnología del vehículo en ciudades de ALyC y Ciudades con flotas entre 300 y 10 autobuses eléctricos, junio 2021



Fuente: Autores con base en investigación de casos descritos en el Anexo

Tabla 1 Flotas de autobuses eléctricos, de acuerdo con tamaño de flota contratada y tecnología del vehículo junio 2021

Ciudad (país)	Trolebús de nueva generación	Trolebús	Eléctrico de baterías	Total
Bogotá	0	0	1485	1485
Santiago	0	0	776	776
Ciudad de México	193	100	9	302
São Paulo	0	201	17	218
São Paulo, RM	0	85	0	85
Medellín	0	0	64	64
Mendoza	13	32	18	63
Guadalajara	63	0	0	63
Córdoba	0	51	0	51
Cali	0	0	35	35

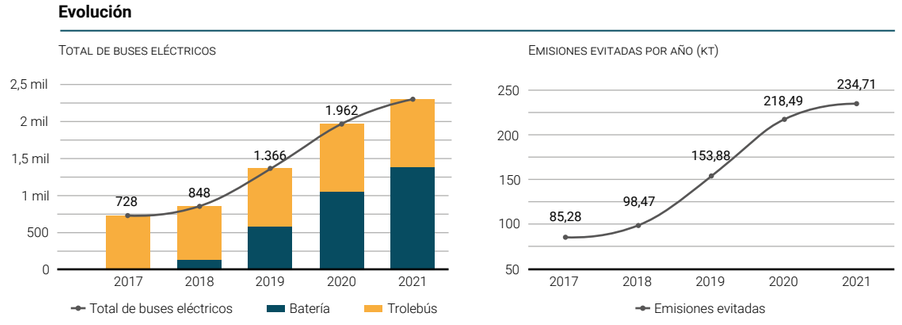
Ciudad (país)	Trolebús de nueva generación	Trolebús	Eléctrico de baterías	Total
Bridgetown	0	0	33	33
Rosario	12	20	0	32
Montevideo	0	0	30	30
Campinas	0	0	17	17

Fuente: Autores con base en investigación de casos descritos en el Anexo

En ALyC la primera flota de gran escala fue implementada en Santiago de Chile en 2017 con 200 vehículos, desde entonces la Dirección de Transporte Público (autoridad responsable por el transporte público a nivel nacional) y las empresas transportistas han continuado con la incorporación de nuevas flotas, hasta un total actual de 776 vehículos en operación (Ministerio de Energía, 2021).

Un caso semejante es el de la ciudad de Bogotá que, en 2019, ejecutó los primeros procesos de contratación de provisión y operación de buses eléctricos en el Sistema Zonal de Transmilenio, en el que se adjudicaron contratos por 483 autobuses. Actualmente, el sistema cuenta con 483 en operación y 1.485 en total contratados.

Figura 3 Total de autobuses eléctricos acumulados en ALyC



Fuente: LABMOB, 2021, consultado en 25 de mayo de 2021

Como se aprecia en la Figura 3, aunque ha habido implementaciones recientes de trolebuses de baterías el crecimiento en el número de vehículos eléctricos en la región se debe

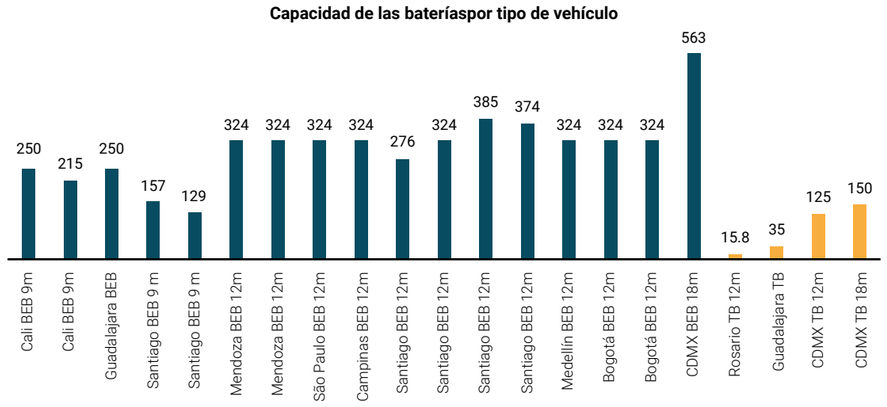
a la rápida aparición de autobuses de baterías los últimos 4 años. El volumen de vehículos en operación en la región permite identificar algunas tendencias de mercado, que se describen en las siguientes secciones del documento. Sin embargo, como será abordado en otras partes de este documento, algunas de estas características son susceptibles a cambios rápidos en la medida que el despliegue de flotas alcanza nuevas ciudades, la tecnología cambia y la operación se adapta a estas nuevas tecnologías.

Flotas en operación y sus características

Las características de las flotas de autobuses eléctricos desplegadas en ALyC, son semejantes a las observadas en el contexto global. De acuerdo con la base de datos consolidada (ANEXO) las características predominantes de estas flotas son las siguientes, (Anexo):

1. Vehículos de 12 metros, a veces llamados convencionales o padrones (Figura 1)
2. Estrategia de recarga se basa en cargadores de manguera o conector (tipo plug-in), localizados en los patios de mantenimiento y resguardo de las unidades.
3. Las características básicas de los vehículos son: baterías de ion litio-ferrofosfato (LFP) con una capacidad media de almacenamiento energético de 330 kWh
4. Tanto las baterías de los vehículos como los cargadores de recarga tienden a identificarse como de carga lenta, permitiendo una recarga completa de los vehículos en plazos de entre 4 y 6 horas.
5. Por otro lado, los cargadores son de tipo conector y presentan rangos de potencia entre 75kW y 210 kW, distribuidos entre 1 a 3 mangueras, con una potencia media por conector de mangueras de 70 kW.
6. Los vehículos han sido incorporados han operación buscando una autonomía en un rango de 200 a 250 km con obligaciones contractuales de los proveedores de flota u operadores.

Figura 4 Capacidad de las baterías por tipo de vehículo, observadas en las flotas en operación y contratadas en América Latina, junio 2021



Fuente: Autores con base en investigación de casos descritos en el Anexo

Es relevante destacar que, la gran mayoría de estos vehículos operan en rutas urbanas convencionales, en donde las condiciones generales de operación son: carril de tránsito mixto, pago abordo del vehículo, paradas continuas y embarque de pasajeros por el lado derecho del vehículo. Si bien la orografía de las ciudades es diversa, encontrándose ciudades con relieves más accidentados como Medellín y Sao Paulo, estos autobuses han sido introducidos a rutas y tramos viales con características viales favorables a la operación y con pendientes moderadas o acotadas a ciertas secciones. Sin embargo, estas experiencias ya comienzan a mostrar como las variaciones de estas condiciones de operación pueden impactar en los consumos energéticos de los vehículos.

Figura 5 Perfil de elevación de L1 y L0, Av. 80 de Metroplús en la ciudad de Medellín.



Fuente: Autores con base en investigación de casos descritos en el Anexo

También y como se detallará más adelante, es importante saber que estos autobuses han sido introducidos acotando su operación a rutas específicas con programaciones de servicio definidas en etapas previas a la contratación de los vehículos y del servicio. Tampoco se cuenta con experiencia en la operación de este tipo de vehículos en sistemas de operación “informal”, “persona camión” o con operaciones desreguladas.

Proveedores sector electromovilidad en América latina y el Caribe

El fenómeno de la electromovilidad se ha caracterizado, entre otras cosas, por modificar el ecosistema tradicional del transporte, incorporando nuevos actores en toda la cadena de producción y provisión de material rodante, equipamientos e infraestructura.

Pueden identificarse algunos grupos de actores como son: armadoras y proveedoras de autobuses, proveedoras de infraestructura y equipamientos de recarga, empresas del sector de energía e infraestructura, integradores de soluciones financieras y de los activos, y otros actores. Aunque es complicado establecer un listado exhaustivo de actores, algunos se enlistan en el Cuadro 1.

Cuadro 1 Mapeo general de actores en proyectos de América Latina (listado no exhaustivo)

Armadoras y proveedoras de autobuses	Proveedoras de infraestructura y equipamientos de recarga	Empresas del sector de energía e infraestructura	Integradores y otros actores
Alstom	ABB	TERPEL	AMP Capital
BYD	Loubinsen	CELSIA	Andes motor
Creative Labs	Potencia Industrial	Comisión Federal de Electricidad (CFE) México.	ARC Global Fund
Eletra	Schneider	ENEL X	Ascendal
Foton	Siemens	ENGIE	Ashmore
King Long		Empresas Públicas de Medellín (EPM) Colombia	NeOT Green Mobility
Proterra			VIVIPRA Sumatoria
Sunwin			Transfondo

Armadoras y proveedoras de autobuses	Proveedoras de infraestructura y equipamientos de recarga	Empresas del sector de energía e infraestructura	Integradores y otros actores
Volvo			Vitol
Yutong			Transdev
Zhongtong			John Laing

Fuente: Autores

Sin embargo, es de especial importancia que, en cada contexto de implementación de autobuses eléctricos, se realice un mapeo y contacto con proveedores y prestadores de servicios de soporte para conocer las alternativas disponibles en cada región, país o ciudad.

Figura 6 Ejemplo de herramientas de mapeo de actores: Inventario digital de empresas armadoras de vehículos eléctricos



Fuente: CALSTART, 2021, consultado el 25 de mayo de 2021

Modelos de implementación, inversión y contratación de la operación de buses eléctricos

Como se abordará en este informe, la implementación de autobuses eléctricos trae consigo un nuevo conjunto de retos y necesidades para las autoridades y empresas operadoras que históricamente han sido responsables por la prestación del servicio de transporte público urbano de pasajeros.

Esta situación ha detonado una de las principales innovaciones y tendencias de este fenómeno: la incorporación de nuevos actores a los arreglos contractuales y de prestación del servicio de transporte, por lo tanto, nuevos modelos de negocio. En resumen, los diferentes modelos de implementación de las flotas de buses eléctricos dependen de los actores participantes del proyecto y los mecanismos de contratación o adquisición de los componentes de este proyecto: Flota, baterías y sistemas de recarga.

En ALyC ya se cuenta con nuevos arreglos de prestación del servicio en varios países. Aunque estos nuevos arreglos cuentan con variaciones en cada caso, se puede observar que la separación de la provisión de la flota de la operación es una de las tendencias en la implementación de autobuses eléctricos, difiriendo de los arreglos tradicionales en donde las empresas operadoras han sido históricamente responsables por la adquisición y operación de los vehículos.

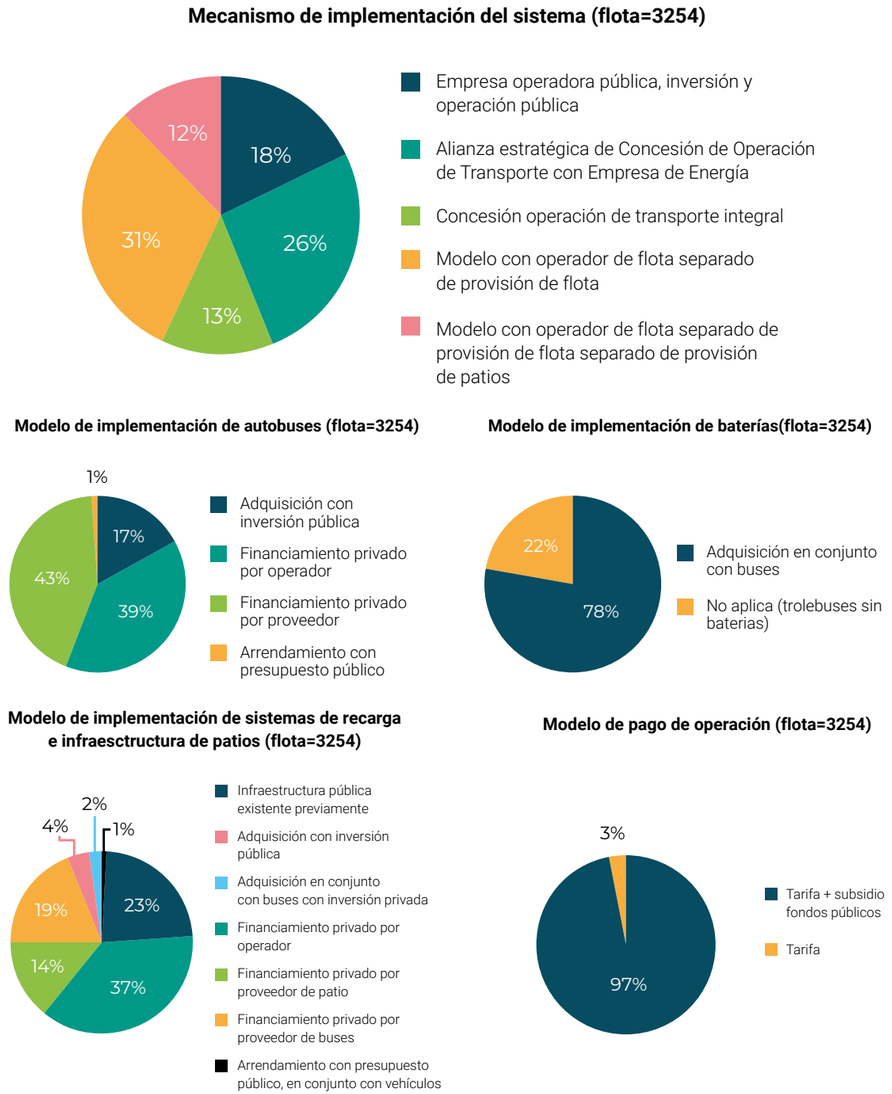
La Figura 7 Modelos de implementación de flotas de autobuses eléctricos en ciudades de ALyC con más de 10 autobuses eléctricos, 2021. muestra un mapeo preliminar de los modelos de implementación de flotas eléctricas en la región, los detalles de la información presentada en esta figura se pueden observar en el anexo de este documento.



Punto de recarga de autobuses eléctricos bajo el modelo de operación, provisión de flota y provisión de patios separados

Fuente: Infobae.com

Figura 7 Modelos de implementación de flotas de autobuses eléctricos en ciudades de ALyC con más de 10 autobuses eléctricos, 2021



Fuente: Autores con base en investigación de casos descritos en el Anexo; porcentajes en función de la flota implementada mediante cada modelo.

Cuadro 2 Definiciones utilizadas por los autores para generación de análisis de modelos de implementación mostrado en la **Figura 7**

Mecanismo de implementación del sistema	
Empresa operadora pública, Inversión y operación pública	Sistemas implementados y operados por una empresa operadora púbica, mediante recursos de fuentes públicas.
Alianza estratégica de Concesión de Operación de Transporte con Empresa de Energía	Sistemas operados por concesionarios de transporte privados que se asocian con una empresa de energía para desplegar autobuses eléctricos dentro de los límites y atribuciones de sus contratos vigentes.
Concesión operación de transporte integral	Implementación mediante una nueva concesión de transporte tradicional a empresas privadas de transporte (también llamada integral) que incluye las responsabilidades de provisión de flota y operación como otros requerimientos asociados.
Modelo con operador de flota separado de provisión de flota	Implementación del servicio de transporte mediante dos contratos separados con privados: 1) provisión de flota y sus requerimientos de infraestructuras y equipos de recarga; y 2) operación de la flota y prestación del servicio.
Modelo con operador de flota separado de provisión de flota separado de provisión de patios	Implementación del servicio de transporte mediante tres contratos separados con privados: 2) provisión de flota, 2) patios, infraestructuras y equipos de recarga y operación de la flota, y 3) prestación del servicio.
Modelo de implementación de autobuses	
Adquisición con inversión pública	Compra con recursos públicos mediante licitación.
Financiamiento privado por operador	Empresa operadora realiza compra la compra de flota con recursos o financiamiento propio.
Financiamiento privado por proveedor	Empresa denominada “proveedora de flota” realiza compra la compra de flota con recursos o financiamiento propio, en los modelos de segregación de provisión y operación de flota.
Arrendamiento con presupuesto público	Arrendamiento puro de flota con presupuesto público.

Modelo de implementación de baterías	
Adquisición en conjunto con buses	Estas son compradas en conjunto con el autobús por el actor responsable de su provisión.
No aplica	No aplica en casos de trolebuses sin baterías.
Modelo de implementación de sistemas de recarga e infraestructura de patios	
Infraestructura pública existente previamente	Casos en donde no fue necesaria la implementación de infraestructura de recarga debido a la existencia previa de redes de catenarias o cableado aéreo en funcionamiento
Adquisición con inversión pública	Implementación del sistema de recarga y adecuaciones en patios mediante inversión pública.
Adquisición en conjunto con buses con inversión privada	Adquisición de equipos de recarga en conjunto con autobuses en modelos de concesión de operación de transporte tradicional (integral).
Financiamiento privado por operador de flota	Implementación mediante actor “operador de flota” en modelos de separación de roles, principalmente por ser dueños o responsables de los patios.
Financiamiento privado por proveedor de buses	Implementación mediante actor “proveedor de flota” en modelos de separación de roles.
Financiamiento privado por proveedor de patio	Implementación mediante actor “proveedor de flota” en modelos de separación de roles en 3 actores, en donde un 3er actor recibe la responsabilidad única de patios e infraestructuras de recarga.
Arrendamiento con presupuesto público, en conjunto con vehículos	Arrendamiento puro de flota con presupuesto público, mediante contratación en conjunto con autobuses.
Modelo de pago de operación	
Tarifa + subsidio fondos públicos	Dedicación de recursos público como complemento a la recaudación por tarifa para la cobertura de los costos diferenciales de operación. En muchos casos los mecanismos de direccionamiento de estos recursos existían previamente a la implementación de flotas eléctricas.
Tarifa	Sistemas fondeados únicamente mediante la tarifa recaudada por la prestación del servicio de transporte.

Fuente: Autores con base en investigación de casos descritos en el Anexo; porcentajes en función de la flota implementada mediante cada modelo.

Marcos regulatorios por país

A nivel global, diversos esfuerzos se realizan para promover y acelerar la transición tecnológica hacia flotas eléctricas. Estos marcos de regulatorios y de política pública suelen ser muy diversos en cuanto al tipo de instrumentos y mecanismos que establecen; sin embargo, éstos se diferencian de acuerdo con el nivel de gobierno que las implementa (nacional, estatal - departamental o local – municipal).

Políticas e instrumentos nacionales

En este ámbito están los instrumentos de política pública establecidos por los gobiernos nacionales que buscan, en general, establecer metas en materia de electromovilidad, mecanismos de coordinación de las entidades involucradas, incentivos tributarios y reglamentos técnicos. Algunos ejemplos aplicables de estos marcos regulatorios a nivel nacional son los siguientes:

Leyes, políticas estrategias nacionales

El reconocimiento de la importancia de la movilidad eléctrica en el cumplimiento de los Objetivos nacionales de Desarrollo Sostenible (ODS) es un elemento clave para el despliegue de esta tecnología en los países. Esto debido a que se generan metas específicas sobre la reducción de vehículos de combustión interna y el aumento de los vehículos eléctricos, se diseñan estrategias y acciones, enviando un mensaje claro a los tomadores de decisión de nivel local y al mercado.

Esta tendencia mundial se deriva principalmente del Acuerdo de Paris firmado en 2015 entre los más de 190 países que hacen parte de la Convención Marco de las Naciones Unidades sobre el Cambio Climático (CMNUCC). A partir de la adopción de este Acuerdo en los países, los mismos han establecido metas de reducción de sus emisiones de efecto invernadero y en consecuencia se definen estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático, entre las cuales se destaca el sector transporte como uno de los principales contribuyentes. También, varios organismos internacionales de manera individual o agrupados dan constante soporte a los países para diseñar e implementar estrategias para el cumplimiento de estas metas, incluyendo apoyo técnico en la construcción de su Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica (ENME).

Adicionalmente, como parte de la ejecución de estas estrategias nacionales, se han expedido documentos normativos de nivel nacional o local que reglamentan aspectos específicos y obliga a las regiones a tomar acciones para su cumplimiento, en algunos casos también cumpliendo estándares técnicos. A continuación, se describen de manera general los marcos regulatorios construidos en los casos de Colombia, Chile y México.

Caso colombiano

En orden cronológico, los elementos reglamentarios aprobados en Colombia y que sentó una base para las decisiones tomadas a nivel local en cuanto a movilidad eléctrica y la respuesta del mercado, son los siguientes:

1. Ley 1844 de 2017[1], aprobando el Acuerdo de Paris y comprometiéndose a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% respecto a la proyección para 2030.
2. Decreto 1116 de 2017[2] del Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, permitió la importación de vehículos eléctricos e híbridos con 0% y 5% de arancel respectivamente.
3. Plan Energético Nacional (PEN) de 2017[3] , estableció la hoja de ruta de la transición energética hacia los vehículos de bajas y cero emisiones.
4. Ley 1931 de 2018[4], estableció directrices para gestionar el cambio climático y reconociendo al sector transporte como uno de los seis sectores prioritarios en este ámbito.
5. Documento CONPES (Consejo Nacional de Política Económica y Social) 3918 de 2018[5], el cual definió metas y estrategias para cumplir con los ODS, incluyendo la promoción de la inversión en tecnologías limpias.
6. Documento CONPES 3943 de 2018[6], que contiene la política del Crecimiento Verde del país y aborda ejes de acción a nivel institucional, de investigación y desarrollo, de inversión económica sostenible, de fortalecimiento de capacidades humanas y de optimización del uso de recursos naturales.
7. Resolución 40807 de 2018[7], Plan Integral de Gestión de Cambio Climático del Ministerio de Minas y Energía, el cual definió como una línea estratégica impulsar la movilidad eléctrica, así como reemplazar la tecnología en la flota de las entidades públicas.
8. Ley 1955 de 2019[8], Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022, en el que se promueven los procesos limpios y bajos en carbono y se establece que es necesario aumentar el ingreso de vehículos limpios a través de la formulación e implementación de una estrategia que fomente el transporte sostenible en todos los modos de transporte presentes en el país. Se viabilizan nuevas fuentes de financiación para los Sistemas de Transporte Público y se reconoce la necesidad de acelerar la entrada de vehículos de cero y bajas emisiones.
9. Ley 1964 de 2019[9], por medio de la cual se promueve el uso de vehículos eléctricos en Colombia reduciendo el impuesto vehicular, estableciendo descuentos en la revisión técnico-mecánica y de emisiones contaminantes, e incentivos respecto a la restricción en circulación vehicular, parqueaderos preferenciales.
10. Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica para Colombia de 2019[10], que prioriza 4 grupos de acciones: que incentiven y faciliten la transición hacia tecnologías de cero y bajas emisiones, que generen aproximaciones específicas al mercado, que creen y fortalezcan el marco regulatorio, político e institucional y que desarrollen infraestructura de recarga hoy, previendo y anticipándose a la transformación de la movilidad. Cabe resaltar que la mayoría de las acciones planteadas implican una coordinación de tres sectores del gobierno: el de transporte, el ambiental y el de energía. Dentro de las tareas que se identifican como pendientes en el país están:

    - Emitir documentos regulatorios adicionales para: definir estándares mínimos de eficiencia energética, homologación de vehículos, restringir la circulación de vehículos con base en sus emisiones, construir planes de ordenamiento territorial que respondan a las necesidades de la electromovilidad.
    - Revisar los instrumentos financieros y tributarios para facilitar e incentivar la transición energética
    - Definir los lineamientos técnicos para la infraestructura de recarga
    - Construir infraestructura pública de recarga de vehículos
    - Definir homologación de vehículos y revisión técnico-mecánica
    - Capacitar a las instituciones públicas

Caso chileno

1. Al igual que Colombia, Chile cuenta con una Estrategia Nacional de Electromovilidad[11] desarrollada en conjunto entre los sectores de Energía, Transporte y Ambiente y adoptada en 2016, en la que se estable como meta llegar a que el 40% de vehículos particulares y el 100% de los vehículos de transporte público sea eléctrico en

[1] http://www.suin-juriscol.gov.co/viewDoc ument.asp?ruta=Leyes/30032607

[2] http://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30032137

[3] https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_documento_para_consulta.pdf

[4] https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/leyes/5f-ley%201931%20de%202018.pdf

[5] https://medioambiente.uexternado.edu.co/conpes-3918-de-2018-estrategia-para-la-implementacion-de-los-objetivos-de-desarrollo-sostenible-ods-en-colombia/

[6] https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/CONPES/Econ%C3%B3micos/3943.pdf

[7] https://www.minenergia.gov.co/plan-integral-cambio-climatico

[8] http://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Leyes/30036488

[9] http://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30036636

[10] https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/ENME.pdf

[11] https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_electromovilidad-8dic-web.pdf

2050. Para esto, establecen como uno de sus ejes estructurantes al transporte público, tanto colectivo como individual. Actualmente esta Estrategia está en proceso de renovación.

2. Adicionalmente, en la Ruta Energética 2018-2022[12] del Ministerio de Energía se refuerza el compromiso con la movilidad eléctrica, estableciendo como meta aumentar en 10 veces el número de vehículos eléctricos que circulan en el país.
3. En 2020 se presentó la Ley de Cambio Climático en el Senado y está en trámite de aprobación actualmente. Este proyecto de ley establece una meta de carbono neutralidad para el año 2050. Adicionalmente, se discute un proyecto de ley sobre eficiencia energética para fijar estándares a vehículos motorizados nuevos, y velar por la interoperabilidad del sistema de recarga (PNUMA, 2019).

Caso mexicano

1. En México, desde 2018 se trabaja en la Estrategia Nacional de Movilidad eléctrica Visión 2030[13] por parte de la Secretaría de Medio ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la cual fue publicada en diciembre del mismo año, y que actualmente se encuentra en revisión. Esta estrategia establece como meta nacional la introducción de por lo menos 500,000 vehículos ligeros y 7,000 vehículos pesados de carga o de pasajeros, en el periodo de 2019 a 2030; así como el 5% de las ventas de vehículos eléctricos o híbridos ligeros y pesados
2. Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN) 2019-2033[14], generado por la Secretaría de Energía, considera el Escenario de Transición Energética Soberana (TES) con la finalidad de plantear los impulsores necesarios para este proceso de cambio
3. Programa de Trabajo 2019 de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT), contempla que se “apoyarán los programas para propiciar un transporte ambientalmente sustentable”.
4. El 4 de septiembre de 2020, la Secretaría de Hacienda y Crédito Público y la Secretaría de Economía publicaron en el Diario Oficial de la Federación el “Acuerdo por el cual se exenta temporalmente el arancel de importación a tres fracciones arancelarias de automóviles eléctricos nuevos”

[12] https://energia.gob.cl/iniciativas/ruta-energetica-liderando-la-modernizacion-energetica-con-sello-ciudadano#:~:text=Con%20Sello%20Ciudadano-,Ruta%20Energ%C3%A9tica%3A%20Liderando%20la%20modernizaci%C3%B3n%20energ%C3%A9tica%20con%20sello%20ciudadano,como%20pa%C3%ADs%20en%20materia%20energ%C3%A9tica.&text=Energ%C3%ADa%20ciudadana%20ser%C3%A1%20nuestro%20lema.

[13] https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/395715/6_SEMARNAT_EstElectroMovilidad.pdf

[14] https://refacsol.com/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2019-2033/

5. Adicionalmente, existen los siguientes incentivos para los vehículos eléctricos en México:

Cuadro 3 Incentivos para los vehículos eléctrico en México

Incentivo	Descripción
Exención del pago del ISAN	Los vehículos eléctricos no pagan el Impuesto sobre Automóviles Nuevos.
Exención del pago de la tenencia	Exención del pago de tenencia en la mayoría de los estados. En el Estado de México no se paga tenencia durante los primeros cinco años, después se paga con un 50% de descuento.
Engomado E /	En la Ciudad y el Estado de México se asigan un engomado especial para identificar a los vehículos eléctricos.
Exención de la Verificación Ambiental	Los vehículos eléctricos, dada las tecnologías utilizadas para su propulsión y el no producir emisiones contaminantes, están exentos del programa de verificación vehicular que implica revisión de emisiones semestrales y la restricción del programa “hoy no circula”.
Deducibilidad del ISR para la adquisición de electrolineras	Enlos criterios Generales de Política Ecónomica para la Iniciativa de Ley de Ingresos y el Proyecto de Presupuesto de Egresos de la Federación correspondientes al Ejercito Fiscal de 2017, se establece un crédito fiscal para deducir el 30% del ISR de infraestructura de recarga de vehículos eléctricos de acceso público.
Eliminación de aranceles	Eliminación de aranceles para la importación de vehículos que utilizan motor eléctrico, incluyendo automóviles, camionetas y camiones de carga. Esto aplica para las empresas que estén suscritas al decreto para el apoyo de la competitividad, según lo propuesto por la Secretaría de Economía.
Placas de auto ecológico	Identificar a los vehículos que cuentan con tecnología hibrida o eléctrica.
ECOTAG	Descuento en vías de cuota: Descuento especial del 20% para autos eléctricos e hibridos en las vías de TeleVía en la Ciudad de México (Autopista Urbana Norte, Autopista Urbana Poniente y Autopista Urbana Sur)

Incentivo	Descripción
Medidor adicional	Para promover la adpción de VE, la CFE instala en el hogar del propietario de un auto enchufable unmedido independiente para facturar exclusivamente el consumo de la electrolinera y conservar el nivel de tarifa doméstica.
Estacionamientos preferentes	ChargeNow y muchos establecimientos en la Ciudad de México, ofrecen a sus visitantes que utilizan vehículos hibridos y eléctricos lugares de estacionamiento preferenciales y/o con estación de carga.

Fuente: (Sánchez Luis Gerardo, Fabela, Manuel de Jesús, Hernández José Ricardo, Flores Oscar, Vázquez David, 2020)

Políticas e instrumentos locales

Por otra parte, a nivel local los poderes ejecutivo y legislativo pueden contribuir a aterrizar las metas y objetivos nacionales con regulación y proyectos específicos. Los contenidos de los actos administrativos van desde la prohibición de comprar para una ciudad vehículos de combustión interna para el transporte público a partir de un año específico, hasta la creación de incentivos tributarios para los vehículos eléctricos y de tributos para colectar recursos adicionales para su financiación.

En el caso de la ciudad de Bogotá, por ejemplo, a finales de 2018 se aprobó un Acuerdo 732 en el Concejo por medio del cual se adoptan medidas para la promoción y masificación de la movilidad eléctrica y demás tecnologías cero emisiones directas de material particulado y establece que se debe "*propender para que desde el año 2.025, el 100% de los vehículos nuevos que operen en el componente troncal del Sistema Integrado de Transporte Público del Distrito Capital, lo hagan con motores eléctricos o tecnologías que generen cero emisiones directas de material particulado*." (Acuerdo 732, Concejo de Bogotá, 2018). Esta meta anticipó a acuerdos en 2020 y 2021, de tal forma que, en el proyecto de Acuerdo que se está discutiendo actualmente en el Concejo, la meta es no adquirir autobuses de combustión interna a partir de 2023.

Sin embargo, en la ciudad de Bogotá no se ha avanzado en la generación de fuentes adicionales de ingresos para pagar los costos del sistema integrado de transporte público. Para garantizar la renovación de la flota de autobuses y su sostenibilidad en el tiempo, es necesario, que se aprueben en el Concejo, cargos a los vehículos privados que tengan destinación específica a inversiones en transporte público.

En Medellín, en 2015 se aprobó el Acuerdo 44 que crea "La estrategia para la promoción y masificación de la movilidad eléctrica" en la ciudad, hablando de generar incentivos económicos y acciones para avanzar en la movilidad eléctrica mientras se cuente con los recursos necesarios dentro del presupuesto local. Posteriormente, se aprobó, el acuerdo 93 de 2017, por medio del cual se incentiva la compra de buses eléctricos en el municipio de Medellín y dio paso al primer bus eléctrico para el sistema Metroplús. Este acuerdo establece que se debe propender por renovar la flota del sistema Metroplús con buses eléctricos, así sea por aumento de capacidad transportadora, terminación de vida útil o pérdida de los vehículos en accidentes de tránsito.

03

Componentes básicos de un proyecto de transporte público con buses eléctricos

La “electromovilidad” o movilidad eléctrica se refiere a los sistemas de transporte que incorporan vehículos cuya principal fuente de propulsión es eléctrica.

Como su nombre lo indica, esta tendencia modifica de manera significativa las prácticas tradicionales de implementación de sistemas de transporte pues estos sistemas se convierten en activos altamente valiosos no solo de la movilidad de las ciudades, sino también del sistema energético. Los componentes básicos de un sistema movilidad eléctrica incluyendo los sistemas de transporte público basados en autobuses eléctricos son los siguientes:

- Vehículos eléctricos (EV’s por sus siglas en inglés): automóviles, motocicletas, autobuses, patines, bicicletas, otros
- Baterías / sistemas de almacenaje de energía
- Infraestructura de carga

A. Autobuses eléctricos

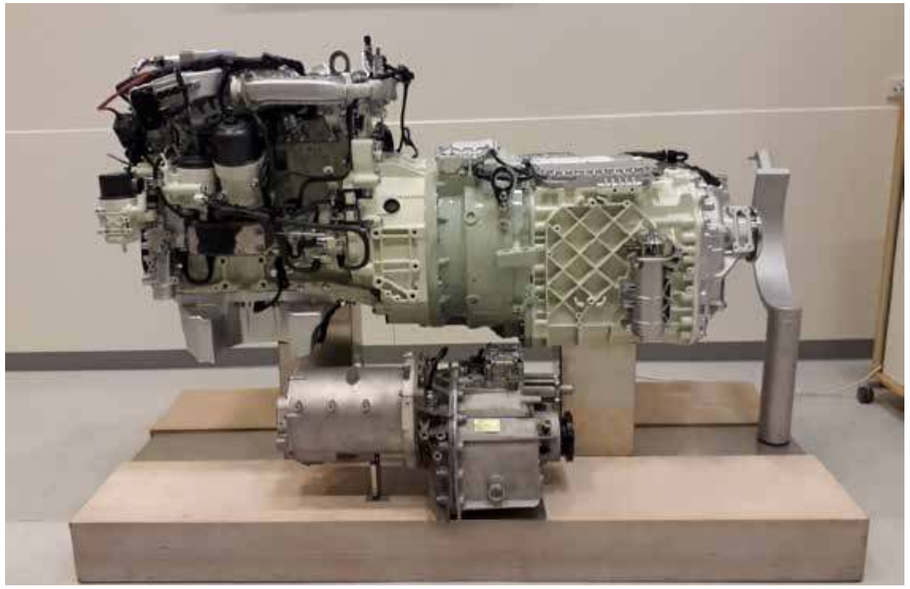
Los autobuses eléctricos, así como el resto de los EV’s, son vehículos más sencillos que los de combustión interna, debido al menor número de componentes y piezas móviles sometidas a altas temperaturas, desgaste y vibraciones necesarios en el proceso de combustión y transmisión mecánica del movimiento.

Debido a esto, los EV’s permiten una importante reducción en los costos de mantenimiento y también son hasta 3 veces más eficientes energéticamente que los vehículos de combustión interna, generando una reducción en sus costos de operación.

Cuadro 4 Comparación de componentes el tren motriz de un Vehículo Eléctrico (EV) y un Vehículo de Combustión Interna (CI)

Sistema motriz en un vehículo de CI	Sistema motriz en un vehículo eléctrico:
Motor: Pistones, árbol de levas, válvulas, rotor...	
Radiador	
Alternador	
Bomba de combustible	Motor (única parte móvil en algunos modelos de vehículos)
Bomba de aceite	
Bomba de agua	Diferencial y transmisión (en algunos casos)
Transmisión	
Diferencial	
(Existen cientos de partes móviles en un vehículo de CI)	

Fuente: Autores con base en University of Tennessee, 2021



Punto Comparación de motor de un autobús se combustión interna y un autobús eléctrico

Fuente: Autores

Actualmente existen diversas categorías de EV's, con una gran variedad de diferencias tecnológicas entre ellos. Sin embargo, se consideran EV's aquellos que utilizan un motor eléctrico como fuente primaria de tracción para su movimiento. Con esta definición, se identifican de forma general 3 tipos de autobuses eléctricos disponibles en el mercado:

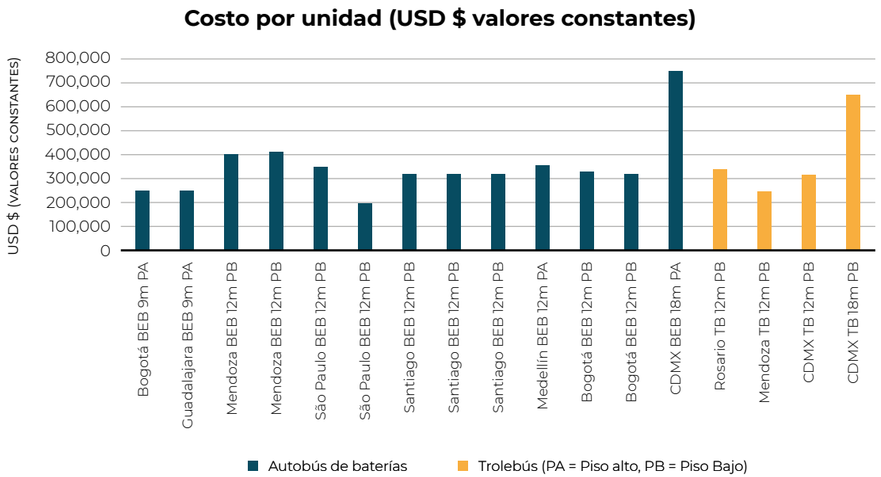
- **Autobuses híbridos enchufables (PHEV por sus siglas en inglés).** Existe una amplia variedad de vehículos denominados híbridos y se consideran, dentro de la gama de vehículos eléctricos, aquellos cuya fuente principal de energía son las baterías que se recargan mediante una alimentación externa, también conocidos como híbridos enchufables o plug-in. En estos vehículos las baterías y el motor eléctrico les permite la operación por un rango extendido de distancia sin utilizar el motor de combustión interna. Siempre que haya suficiente energía y potencia disponibles, un PHEV puede operar únicamente con el motor eléctrico, siendo esta operación libre de emisiones contaminantes. Su ventaja se presenta debido a la flexibilidad que les da tener un motor eléctrico adicional; que les permite recargar la batería en ruta y también impulsar directamente el vehículo. Esta modalidad de autobuses no ha sido implementada en ALyC, los autobuses híbridos operando en diversas ciudades de la región corresponden a vehículos con motores de combustión interna complementados con tecnología de baterías y motores eléctricos, con una relación energética inversa a los PHEV.
- **Autobuses eléctricos de baterías (BEB por sus siglas en inglés).** Tienen un motor eléctrico alimentado por un paquete de baterías recargables. Los vehículos eléctricos de baterías se diferencian entre si principalmente por el tamaño del paquete de baterías (capacidad de almacenamiento), química de las baterías, estrategia de recarga (lenta o rápida) y la arquitectura y componentes de su tren motriz.
- **Trolebuses**: (**TB**) Los trolebuses modernos son en realidad vehículos eléctricos de baterías también. El elemento distintivo de estos vehículos continúa siendo los postes, cañas, plumas o troles que les permiten conectarse a las redes de cableado aéreo (catenarias) para que los vehículos puedan alimentarse de energía eléctrica de forma continua. Sin embargo, su banco de baterías permite al vehículo recorrer cierta distancia sin necesidad de estar conectados a las catenarias dando mayor flexibilidad a su operación.



Flota de Trolebuses de baterías de 12 metros en el patio de Tetepilco del Sistema de Transportes Eléctricos (STE) de la Ciudad de México
Fuente: Hiram Escalante

Los costos de los autobuses y otros vehículos eléctricos se han reducido los últimos años, principalmente debido a la reducción en los costos de adquisición de las baterías, principal componente de e estos vehículos que será abordado en la siguiente sección. Los valores observados en la región, de acuerdo con los datos disponibles se presentan en la Figura 97.

Figura 8 Costo de buses eléctricos de 12 metros en proyectos implementados en América Latina.



Fuente: Autores con base en Anexo

b. Baterías

Las baterías son un elemento central del funcionamiento de los sistemas de transporte eléctrico. Una batería transforma energía química en energía eléctrica y se componen de celdas que forman un paquete con las características suficientes para alimentar los motores de los vehículos y permitirles moverse.

La importancia de las baterías y de su química reside en que de sus características dependen la estrategia de recarga del vehículo y a su vez los equipos e infraestructuras necesarias para ello. Los aspectos que deben tenerse en cuenta de las baterías además del costo son la densidad de energía, la densidad de potencia y finalmente su vida útil (Karlsson, 2016)

Baterías de carga lenta y carga rápida.

La química de las baterías es determinante para definir la estrategia de recarga del vehículo. Cuando la carga se realiza con menos frecuencia (carga nocturna o con pocas recargas durante el día), sistemas de baterías con mayor almacenamiento energético son recomendados, esto significa un mayor volumen de baterías y por tanto peso en el vehículo, al mismo tiempo que la recarga puede realizarse en periodos más largos con sistemas de recarga de menores rangos de potencia. Por otro lado, cuando aumenta la frecuencia de carga, por ejemplo, con cargadores en cada estación, la energía almacenada necesaria en la batería puede reducirse y, por tanto, el tamaño de ésta, sin embargo, la batería deberá ser más adecuada para rangos elevados de potencia, necesarios para realizar una mayor recarga de la batería en rangos de tiempo más cortos.

Las diferentes estrategias de recarga de las baterías de los autobuses se han clasificado en 2 grandes grupos: Carga lenta y Carga rápida. Esta denominación obedece a una separación realizada por el mercado para diferentes soluciones de sistemas de baterías y de estrategias de recargas ofrecidas en los autobuses eléctricos. Sin embargo, no existe una definición formal de estos conceptos que establezca parámetros de potencia de carga o especificaciones de las baterías. Adicionalmente, la tecnología de baterías ion-litio avanza y cambia rápidamente, existiendo también soluciones intermedias. Por ejemplo, existen vehículos con tecnología usualmente denominada de carga lenta, que, sin embargo, sus sistemas de transmisión de energía al interior dividen la potencia de recarga en 2, 3 o 4 puertos de conexión, permitiendo dividir el tiempo de recarga.

Por los motivos descritos anteriormente, es difícil establecer definiciones categóricas sobre los autobuses de carga lenta o rápida. Sin embargo, observando las características que diferencian a los autobuses y sistemas de baterías el Cuadro 5 se presenta un resumen de las diferentes tipologías de autobuses y sistemas de baterías frente la velocidad de recarga.

Cuadro 5 Comparación características de autobuses con sistemas de baterías de carga lenta o carga rápida.

Autobuses con sistemas de baterías de carga lenta	Autobuses con sistemas de baterías carga rápida
Menor costo por almacenamiento energético	Mayor costo por almacenamiento energético
Más energía disponible: 200 – 300 kWh	Menos energía disponible: 50 – 150 kWh
Permiten recorrer distancias más largas entre recargas	Permiten recorrer distancias más cortas entre recargas
Los vehículos requieren mayor número de celdas, esto equivale a más peso y por tanto mayor consumo	Menor volumen de baterías (número de celdas), implicando un menor peso, por tanto, menor consumo
Potencia de carga baja (hasta 80kW), mayor tiempo de recarga, posibilidad de realizar pocos ciclos de recarga al día. Se usan mangueras y conectores, estos pueden ser conectados en AC o DC.	Potencia de carga alta (400 kW), tiempo de recarga corto y posibilidad de cargar continuamente durante la operación Se pueden usar conectores de alta potencia o pantógrafos para ejecutar la recarga en DC.
Generalmente asociados a estrategias de carga nocturna o con pocas recargas diurnas.	Generalmente asociados a estrategias de carga de oportunidad
Se suelen llamar de carga lenta debido al tiempo necesario para lograr una recarga total de batería: entre 4 y 5 horas	Se suelen llamar de carga rápida debido al tiempo necesario para lograr una recarga total de la batería: 20 – 30 minutos

Fuente: Autores con base en 35South, 2019

Algunos ejemplos de baterías de iones de litio utilizadas para vehículos eléctricos son níquel-manganeso cobalto (NMC), níquel-cobalto-aluminio (NCA), fosfato de hierro y litio (LFP) y titanato de litio (LTO). De acuerdo con la información colectada, en ALyC los

autobuses eléctricos usan baterías de fosfato de hierro y litio (LFP) en su totalidad, correspondientes con una estrategia de carga lenta (Pihlatie & Pippuri-Mäkeläinen, 2019)

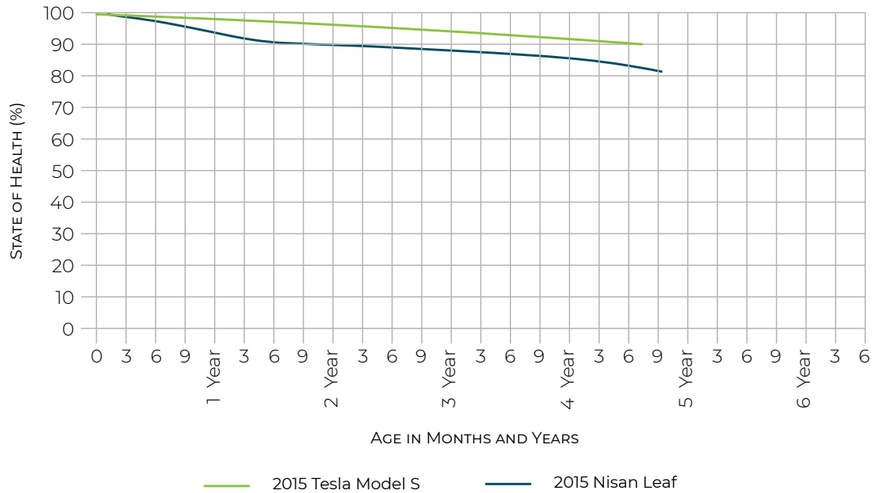
Degradación de las baterías (SOH) y vida útil

Todas las baterías enfrentan un proceso de degradación de su capacidad de almacenamiento energético, esta característica debe ser conocida y estudiada en la etapa de diseño e implementación de los sistemas de movilidad eléctrica. A esta característica se le conoce como estado de salud de la batería (SOH, por sus siglas en ingles).

El comportamiento de la curva de degradación de las baterías generalmente se mide en ciclos de descarga y recarga, y debe ser informado por las empresas proveedoras de las baterías.

Así mismo, en función de este comportamiento y del rango necesario de operación de los autobuses se puede determinar la vida útil de la batería para su uso en sistemas de transporte público. Actualmente, se estima que las baterías de autobuses eléctricos pueden operar en sistemas de transporte por hasta 8 años manteniendo una capacidad de almacenamiento energético del 70-80% del original (Linscott Meredith, 2021). Un ejemplo del comportamiento del SOH de una batería ion-litio se muestra en la Figura 9.

Figura 9 : Comparación de la degradación de la batería del Tesla Model S 2015 (refrigeración líquida) frente al Nissan Leaf 2015 (refrigeración pasiva por aire).



Fuente: Geotab, 2020

Adicionalmente, las baterías están diseñadas para lograr su máximo desempeño y vida útil en operación a ciertos rangos de temperatura; un inadecuado uso de la batería en cuanto la estrategia de carga, problemas en los sistemas de cableado del autobús o, fallas en el funcionamiento del sistema de enfriamiento puede elevar la temperatura de la batería durante su operación.

Este aspecto debe ser cuidado para preservar la integridad de los sistemas y la seguridad de las personas y para no provocar un desgaste más acelerado de la SOH. La operación y recarga en rangos elevados de temperatura es uno de los factores más comunes por los cuales el SOH se degrada más rápidamente de lo esperado por los fabricantes.

Adicionalmente, los vehículos suelen contar con sistemas de gestión de la batería que permiten controlar la carga y descarga, la temperatura, la protección y el balance de las celdas de las baterías. Estos sistemas permitan tener información sobre el pack de batería y controlar los procesos de operación y recarga, permitiendo mitigar riesgos, maximizar la eficiencia en el uso de los vehículos eléctricos y alargar la vida útil de los activos.

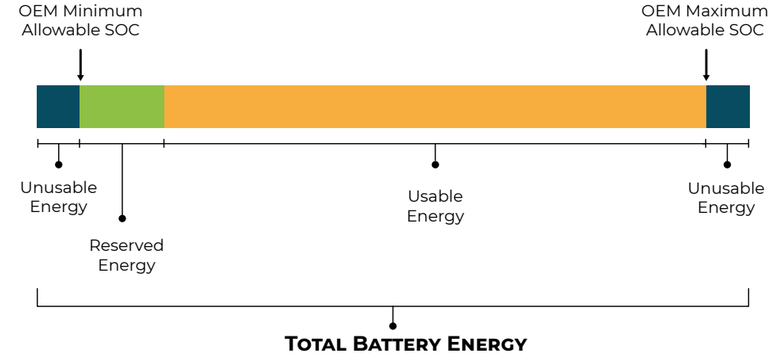
Este aspecto es especialmente relevante a ser considerado en la etapa de contratación o Compra de los autobuses y sistemas de recarga. En la práctica, lo que se busca desde el punto de vista de la operación, es contar con un sistema de baterías que permita sacar el mayor provecho en el largo plazo, para ello, se observan algunas medidas en los contratos de compra, provisión o renta de los vehículos en la actualidad:

- Garantías sobre el desempeño de las baterías en un plazo determinado, asociando a un mínimo (garantizado) del SOC inicial (entre el 70 y el 80%, comúnmente)
- Incorporación de una obligación de un reemplazo del sistema de baterías en un plazo determinado o en función de un nivel de degradación alcanzado (entre 6 y 8 años o entre el 70 y el 80% del SOC inicial)

Estado de carga (SOC) y rango útil

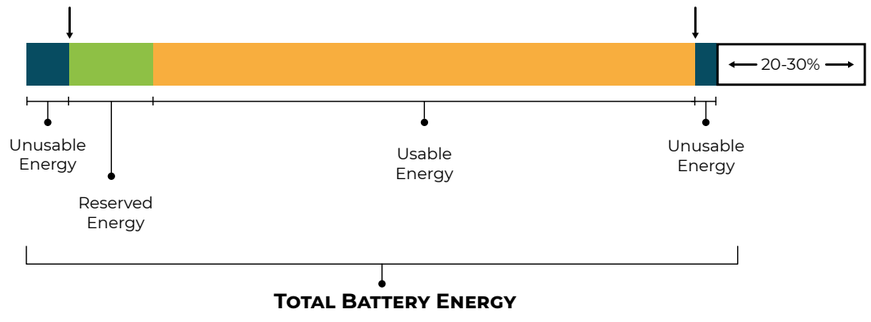
El estado de carga (SOC por sus siglas en inglés) es una medida del nivel de carga de la batería. La gestión de la batería necesaria para maximizar la vida útil de la batería incluye el cuidado de su SOC mínimo y máximo. En tanto que el rango utilizado de la batería sea menor (es decir que la diferencia entre el valor máximo y mínimo de SOC se mantengan lo más cerca posible), la degradación de la batería tenderá a ser menor a lo largo de su vida útil. A este concepto se le denomina ventana de SOC y define la energía disponible para la operación (a veces denominado rango útil de la batería). Conforme la batería se usa y su capacidad de almacenar energía se degrada (SOH), el rango útil de la batería será menor, impactando en el rango útil y consecuentemente en la autonomía del vehículo (Linscott Meredith, 2021).

Figura 10 Estado de la batería en el estado inicial y degradado.



Fuente: Erik, 2017

Figura 10 Estado de la batería en el estado inicial y degradado.



Fuente: Erik, 2017

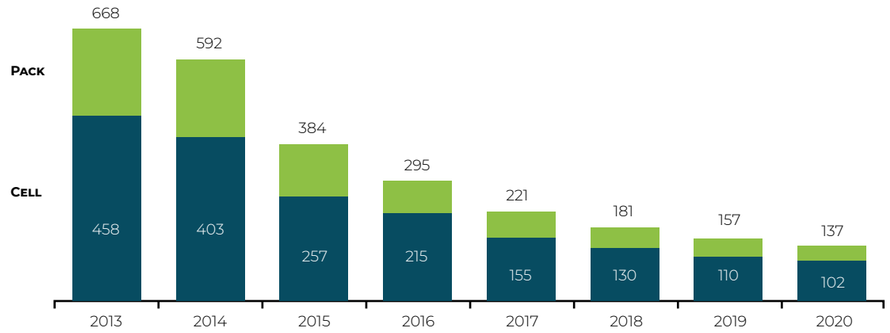
El rango útil de las baterías generalmente se establece con un rango mínimo entre el 20% y el 30% de reserva de SOC. Sin embargo, la definición del rango exacto de la ventana SOC dependerá de la tecnología, arquitectura y química de las baterías y las necesidades de la operación. Es decir, la definición de este rango o ventana SOC se realiza mediante un balance entre las necesidades operativas de la flota, los costos y garantías de las baterías.

Es importante enfatizar que, la definición de la ventana SOC y con ello la estrategia de recarga deben ser validadas por la empresa proveedora de las baterías, haciéndose responsables por garantizar el funcionamiento de estas durante los plazos establecidos en la oferta comercial y en los contractos de provisión de la flota.

Tendencia en el mercado de baterías

El desarrollo acelerado de la tecnología de las celdas de baterías, en particular de la tecnología ion-litio, ha permitido a la electromovilidad reducir su costo, mejorar su desempeño y su acceso masivo a los sistemas de transporte urbano alrededor del mundo. Las nuevas químicas de las baterías de vehículos eléctricos se están desarrollando y adaptando a mayor velocidad que en el pasado (McKerracher Colin, Izadi-Najafabadi Ali, Aleksandra O'Donovan, 2020).

Figura 11 Precios promedio paquetes y celdas de baterías ponderado por volumen (valores reales 2020 USD / kWh)



Fuente: (McKerracher Colin, Izadi-Najafabadi Ali, Aleksandra O'Donovan, 2020)

De acuerdo con la tendencia de los precios de los componentes de EV's, se espera que en los próximos años esta tecnología alcance la paridad en costos de adquisición frente a los vehículos de combustión interna.

c. Infraestructura de recarga

En el mercado de autobuses eléctricos existen diferentes tipologías de los equipos usados para la recarga de baterías. Los diferentes equipos permiten diferentes estrategias de recarga en conjunto con las características de las baterías de los vehículos descritas anteriormente, que a su vez determinan la logística diaria de preparación y operación de

los vehículos. Aunque ciertos equipos son recomendados específicamente para ciertas estrategias de recarga, existen algunas opciones intermedias en el mercado.

A su vez, estos componentes tienen especial importancia debido al consumo y demanda de energía eléctrica que pueden requerir, así como de la infraestructura de soporte como subestaciones, transformadores, etc., necesaria para su funcionamiento.



Patio de recarga con cargadores de conector

Fuente: THINK b, Adobe Stock

Es importante tomar en cuenta que, en función del tamaño de la flota, la estrategia de recarga y las características de los equipamientos, la operación de los autobuses eléctricos se traduce en una demanda de energía llevada a los puntos en donde se realiza la recarga.

Dado que las redes de distribución de electricidad en las ciudades cuentan con sus propias restricciones de capacidad y en algunos casos situaciones de sobrecarga, la introducción de autobuses eléctricos a los contextos urbanos hace necesario un dimensionamiento temprano del requerimiento energético, así como una planeación que busque optimizar la concentración de la demanda de energía de la red.

También, se vuelve crucial la participación de las empresas de energía a lo largo del proceso de planeación e implementación de la flota de autobuses eléctricos. Estos aspectos se abordan de manera más amplia en el Capítulo 4 de este documento. A continuación, se presentan los equipos de recarga y estrategias de recarga más comunes en el ámbito de la operación de autobuses eléctricos.

Equipos y sistemas de recarga

Los equipos de recarga más comunes y comercialmente disponibles se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 Tipologías de equipos de recarga de autobuses eléctricos

Tipo	Potencia de salida	Corriente de salida	Costo*
Cargadores de manguera y conector o enchufe (Nivel 3 para autobuses)	Hasta 80 kW por manguera. Existen alternativas con capacidad de entregar una potencia superior (150 a 200 kW), estos suelen funcionar con 2 o más mangueras distribuyendo la potencia en dosis de 75-80 kW para uno o varios vehículos simultáneamente	DC o AC	Entre 5mil y 25 mil dólares. Los cargadores de DC suelen ser más costosos que los AC.
Pantógrafos	150 – 600 kW Su diseño permite la transmisión de energía en elevados rangos de potencia. Opera con protocolos de comunicación que permiten sincronización con el vehículo para efectuar la recarga.	DC	Entre 120 - 180 mil dólares.
Catenarias o líneas de tendido aéreo.	Variable Requiere de subestaciones localizadas a lo largo de la red (ente 2 -3 kilómetros), para mantener el voltaje y corriente de las líneas áreas de alimentación.	DC	250mil - 1.2 millones de dólares por km. Su costo de instalación varía dependiendo de condiciones de entorno urbano. Presupuesto de mantenimiento que debe ser considerado.
Carga por inducción: Transferencia inalámbrica de electricidad por inducción estática o dinámica.	50 – 250 kW	NA	300 mil dólares o superior Con poca experiencia en flotas de autobuses

Nota: Los costos de referencia de los equipos de recarga no consideran costo de la infraestructura auxiliar, misma que es más susceptible a variación que los costos de los equipos.

Fuente: Autores con base en Andersson, 2015; Karlsson, 2016; Shyamasis Das , Chandana Sasidharan, 2019; Volvo Bus Corporation, n.d..

El mercado avanza en la incorporación de nuevas alternativas como la recarga por inducción, misma que ha sido probada y está disponible en otros sectores, pero sin oferta comercial aún en la región. Por lo que, es uno de los aspectos a los que se debe hacer seguimiento para eventualmente evaluar su pertinencia en los proyectos de electromovilidad.

Tipos de estrategias o aplicaciones de recarga

Se denominan estrategias o aplicaciones de recarga a la logística que mantienen los autobuses eléctricos para la recarga de sus baterías manteniendo sus actividades de prestación del servicio. Los proveedores y la literatura disponible ofrecen diferentes terminologías para las diferentes aplicaciones de recarga; no obstante, a continuación, se describen algunas de las principales alternativas.

- Carga nocturna en patios. Esta estrategia se asemeja a la actividad de reabastecimiento de los autobuses diésel, misma que se realiza una vez al día durante la pernocta de los vehículos. Para ello, es necesario que el tiempo que los vehículos tienen disponible para recargar durante la noche sea suficiente para realizar esta actividad. Así mismo, es necesario que la capacidad de las baterías permita lograr el recorrido diario de los vehículos (Low Carbon Vehicle Partnership, 2016). Prácticamente todos los sistemas de autobuses eléctricos utilizan esta estrategia ya sea como base de su operación o como complemento a otra estrategia de recarga. En general esta aplicación se basa en cargadores de manguera y conector localizados en uno o pocos puntos de recarga.
- Carga nocturna y diurna en patios o terminales. En esta estrategia la recarga nocturna de los autobuses se complementa con eventos de recarga planificados dentro de la programación de servicio de las unidades. Esta dinámica es necesaria y ampliamente utilizada debido a que, en muchos casos, el rango de carga disponible de las baterías no permite cumplir con la programación diaria de servicio con una sola recarga por vehículo operativo. Esta estrategia de recarga suele basarse en las mismas infraestructuras que la recarga nocturna, en ocasiones apoyada por pocos puntos de recarga localizados estratégicamente para facilitar la recarga diurna de algunas unidades.
- Carga de oportunidad. Se denomina así a la estrategia de recargar el vehículo en cada oportunidad que la operación permita. Esto en general sucede en momentos cortos cuando los vehículos realizan pausas programadas de 1 a 3 minutos (o más) en paradas o terminales. Debido al tiempo y que el vehículo se encuentra en ruta, la aplicación de la recarga debe hacerse de forma estandarizada, rápida y proveyendo de la mayor cantidad de energía posible a los autobuses. Para la operación de

esta estrategia de recarga se han desarrollado e implementado los cargadores tipo pantógrafo (European Automobile Manufacturers Association, 2017). Sin embargo, otros tipos de equipos pueden acoplarse con esta estrategia de recarga, por ejemplo, el uso estratégico de tramos de catenaria o de recarga inductiva en carriles de circulación de los autobuses.

- Carga continua. Esta aplicación de recarga significa que el vehículo está en contacto con una fuente de alimentación de manera permanente o en gran parte de su recorrido. Esta aplicación de recarga se relaciona directamente con los trolebuses y sus catenarias; sin embargo, ésta es utilizada también por sistemas inductivos de recarga de baterías.

04

Planeación

Los elementos metodológicos más recurrentes en la bibliografía y la evidencia de trabajos previos de implementación de flotas eléctricas se pueden sintetizar en los siguientes dos conceptos:

- Como su nombre lo indica la electromovilidad es la intersección de dos sectores que tradicionalmente se han encontrado distanciados. En tanto que la planeación y gestión de los sistemas de transporte es responsabilidad de las autoridades de este sector, es imperante que éstas construyan los vínculos adecuados con los actores del sector energía para garantizar el funcionamiento de los sistemas de transporte eléctrico.
- Debe entenderse que el bus eléctrico es diferente al bus de combustión interna. Tanto los buses eléctricos como otras nuevas alternativas de vehículos de bajas emisiones difieren tecnológica y operativamente de los buses de combustión interna. En el proceso de implementación de sistemas de transporte eléctrico no se trata únicamente de escoger el mejor vehículo, se trata de diseñar el sistema en función de las necesidades del servicio y las características de la tecnología.

Los aspectos necesarios para la adopción exitosa de vehículos eléctricos se desprenden de forma general de esta aproximación. Esta sección aborda diferentes elementos que se deben revisar durante la etapa de planeación para la implementación de autobuses eléctricos en rutas de transporte público urbano de pasajeros.

A. Mapeo de actores y roles

En esta actividad se debe realizar una lista de actores (organizaciones públicas y privadas) que ejercen, directa o indirectamente, influencia sobre el proyecto. Los actores involucrados incluyen fabricantes y proveedores del autobús, empresas operadoras, la entidad responsable de la planeación, operación y gestión del sistema de transporte, infraestructura, las empresas de energía local, y los proveedores de tecnología, así como otros actores que pueden actuar como integradores o intermediarios entre estos actores primarios (Low Carbon Vehicle Partnership, 2016).

De manera práctica, puede decirse que establecer contacto con los proveedores de vehículos, tecnología y equipos, permitirá una mejor comprensión del mercado y productos disponibles. Por otro lado, la vinculación con las autoridades responsables por la infraestructura y la empresa de energía pueden acelerar los procesos de diagnóstico de los puntos previstos para recarga de los vehículos, así como la preparación de los proyectos y presupuestación de la intervención de estos.

B. Estudio de mercado

Esta actividad se refiere a la realización de un estudio inicial para identificar las condiciones de mercado del proyecto. Todo estudio de mercado puede regirse por dos conceptos primarios: demanda y oferta.

Demanda de autobuses eléctricos, en el contexto de la ciudad o proyecto.
En este contexto en específico, el segmento de demanda corresponde al sistema de transporte en el cual se busca implementar la flota de autobuses eléctricos. En este sentido se recomienda contar con un balance actualizado de las características del sistema de transporte en los siguientes términos:

- Rutas y características de operación: incluyendo sus programaciones de servicio o su oferta horaria prevista y ejecutada.
- Flota requerida, considerando su tipología, funcionalidades y otras características.
- Empresas operadoras y/o transportistas

Oferta autobuses eléctricos y sus equipos de soporte
Esta actividad busca conocer la disponibilidad de vehículos, baterías y sistemas de recarga para un proyecto o contexto específico. Como se ha dicho anteriormente, la variedad en la tecnología presente a nivel global dista mucho de la oferta comercial en cada región, país o ciudad. Para ello, se recomienda realizar un estudio de mercado que evalúe la oferta de buses y la posibilidad de satisfacer necesidades operativas de cada ciudad específica.

En esta etapa, es posible colectar información preliminar sobre autonomía, la eficiencia energética y costos de los vehículos evaluados que será muy relevante para la planeación del proyecto y posteriormente su implementación.

Algunos resultados esperados de esta actividad son los siguientes:

1. Consolidación de una base de datos fabricantes y proveedores de equipos y servicios: esta información puede colectarse mediante datos de contacto de aquellos proveedores que se hayan acercado a la ciudad o sistema de transporte, investigación con ciudades próximas de la región o país, que hayan implementado sistemas de autobuses eléctricos, o búsqueda en fuentes secundarias. Este listado preliminar deberá validarse para conocer si los proveedores identificados tienen la posibilidad de realizar ofertas formales en la ciudad. Esta base de datos deberá contener:
   a. Información general sobre las empresas que comercializan vehículos e infraestructura de carga y sobre su interés en el proyecto.
   b. Establecimiento en el país, localización más cercana de oficinas y talleres,
   c. Servicios de postventa y garantías ofrecidas,
   d. Datos de contacto.

2. Vehículos, baterías: Disponibilidad de tipologías vehiculares.
   a. Características generales y detalles técnicos de los productos ofrecidos,
   b. Tiempos y condiciones de entrega.
   c. Elementos operativos básicos como funcionalidades, desempeño, requerimientos de operación, mantenimiento, entre otros.
   d. Experiencias operativas en todo el mundo.

3. Cargadores e infraestructura: Características de los sistemas de recarga e infraestructura requeridos por las diversas opciones de productos identificadas. Se debe identificar específicamente:
   a. Características, elementos operativos y experiencias en otras partes del mundo,
   b. Requerimientos y tiempos de instalación,
   c. Impacto y requerimientos adicionales en las infraestructuras actuales del sistema,

d. Normativas aplicables,
e. Costo de los cargadores que compondrán la infraestructura de carga

4. Costos. Es un elemento básico del estudio de mercado. Se recomienda colectar información de los costos conocidos en todo el ciclo de vida de todos los productos:
   a. CAPEX: Costos de adquisición e implementación
   b. OPEX: Operación, mantenimiento, seguros, descarte, valor de rescate o residual, otros.

C. Planeación operativa y energética de la implementación de autobuses eléctricos.

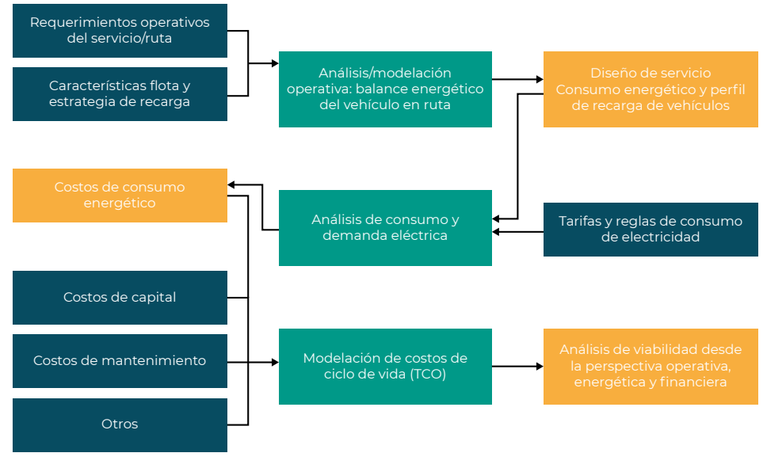
Los EV's son más limpios, silenciosos y eficientes que los vehículos de combustible convencional. Sin embargo, cuando se trata de implementar BEB (buses eléctricos de baterías), el rango de operación de la batería sigue representando una de las barreras percibidas por las autoridades y empresas transportistas, acostumbradas a trabajar con vehículos diésel, en donde éste no es un problema. Ante esta limitante de los autobuses eléctricos, no existe una solución única para todos los sistemas de transporte (Linscott Meredith, 2021).

Existe un consenso derivado de la experiencia adquirida en la implementación de este tipo de vehículos y la literatura disponible que apunta hacia la necesidad de planear la incorporación de vehículos eléctricos en función de las características del servicio.

En concreto esto quiere decir que los BEB incorporados deberán tener suficiente energía para cumplir con el programa de servicio, mediante una estrategia de recarga sostenible durante la vida útil de los activos y del proyecto.

Esta sección describe las actividades y análisis recomendados para realizar una planeación adecuada de la incorporación de flotas de autobuses eléctricos a la operación de rutas urbanas de pasajeros. Actualmente, existen diversas metodologías que abordan este tema; sin embargo, este documento y esta sección optaron por abordar el aspecto de viabilidad de la implementación de los BEB bajo una metodología de 3 pasos propuesta por el Center for Transportation and the Environment y presentada en la Figura 12. A continuación, se describen las etapas 1 y 2 de este proceso de planeación. En tanto que la etapa 3, modelación de costos de ciclo vida o TCO, será abordada en el Capítulo 8 de este documento.

Figura 12 Metodología para el análisis de la electrificación de rutas



Fuente: Hanlin et al., 2018

Análisis o modelación operativa

El objetivo de esta etapa es consolidar en un proceso de análisis de las características operativas de los servicios estudiados y las características de desempeño de los autobuses y sus requerimientos de recarga.

El resultado esperado es un diseño de servicio, tan detallado como sea posible, que valide la viabilidad de operación de determinada flota de autobuses eléctricos y su respectiva estrategia de recarga.

Requerimientos operativos del servicio y de las rutas evaluadas

La introducción exitosa de autobuses eléctricos a la operación depende en gran medida de contar con un programa de servicio confiable que permita planear las actividades del vehículo, su consumo de energía en las baterías y sus momentos de recarga.

Por este motivo, se requiere contar con las características operativas de las rutas evaluadas, con la mayor precisión posible. Se entiende que, en diversos contextos, el dimensionamiento del servicio puede ser realizado a nivel conceptual sin la elaboración de programaciones de servicio detalladas, estar desactualizado y/o el monitoreo del servicio puede ser limitado. En este caso la información de las rutas y el servicio será limitado. Aun en estas condiciones, se recomienda que el proyecto inicie por actualizar la información de oferta y demanda de servicio y establecer un programa de servicio de referencia con el cual se realizará la planeación de la operación de los BEB.

En cualquiera de las aproximaciones de análisis o etapas de planeación de los sistemas de autobuses eléctricos, (nivel estratégico u operacional, con mayor grado de agregación o a nivel muy detallado), se recomienda contar con la siguiente información de las rutas estudiadas:

- Características e información general de la ruta.
- Perfil de ruta, velocidad de operación por tramo,
- Uso de aire acondicionado y otros equipos embarcados.
- Demanda y perfil de carga de pasajeros
- Flota operativa y de reserva
- Horarios de servicio en día útil, sábado y domingo.
- Oferta horaria o programación de servicio
- Kilometraje de servicio y kilometraje medio por vehículo.
- Índices de desempeño operativo como IPK, IPB, otros.

Comportamiento de flota eléctrica y estrategias de recarga

Esta actividad concentra gran parte del esfuerzo técnico a nivel general. Cuando hablamos de estudiar el comportamiento de la flota eléctrica y un determinado contexto de operación es importante saber que los vehículos eléctricos se caracterizan por tener una variabilidad muy alta en términos de consumo energético.

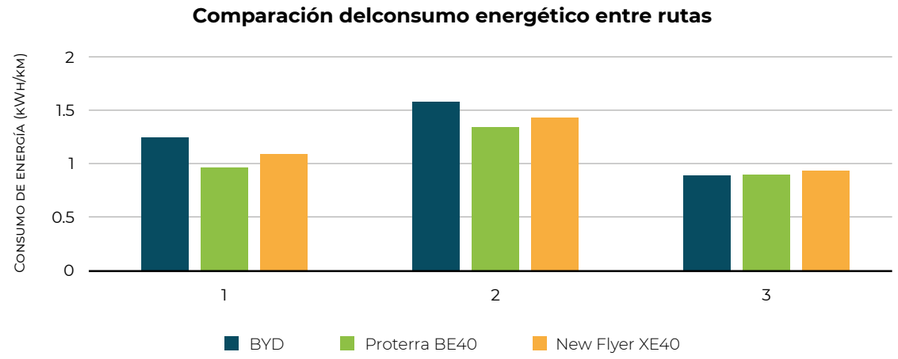
Consumo energético

El consumo energético puede variar significantemente en un vehículo eléctrico en función de diversos factores de la operación como son (Linscott Meredith, 2021):

- Tecnología del vehículo
- Peso o carga
- Uso de los equipamientos embarcados, principalmente el uso de aire condicionado
- Ciclo de manejo y características de la ruta: características del tránsito y congestión, frecuencia de paradas y semáforos
- Velocidad de operación
- Pendientes
- Hábitos de conducción

Un ejemplo de cómo los vehículos eléctricos presentan diferentes consumos energéticos en diferentes contextos de operación se presenta en la Figura 13.

Figura 13 Comparación de consumo energético de 3 BEB en diferentes rutas.



Características básicas de las rutas

Ruta	Extensión [km]	Distancia entre paradas [m]	Número de paradas	Velocidad máxima [km/h]	Velocidad promedio [km/h]
1	3	200	15	32	19
2	3	750	4	64	42
3	6	6.000	1	64	61

Características de los autobuses evaluados

Buses	Batería [kWh]	Estrategia de recarga	Potencia del cargador [kW]
BYD	280 kWh	Recarga nocturna	40 kW
Proterra BE40	74 kWh	Recarga de oportunidad	160 kW
New Flyer XE40	208 kWh	Recarga de oportunidad	80 kW

Fuente: The Larson Instititue, 2015; The Larson Institute & PennState, 2014; The Thomas Institute, 2015

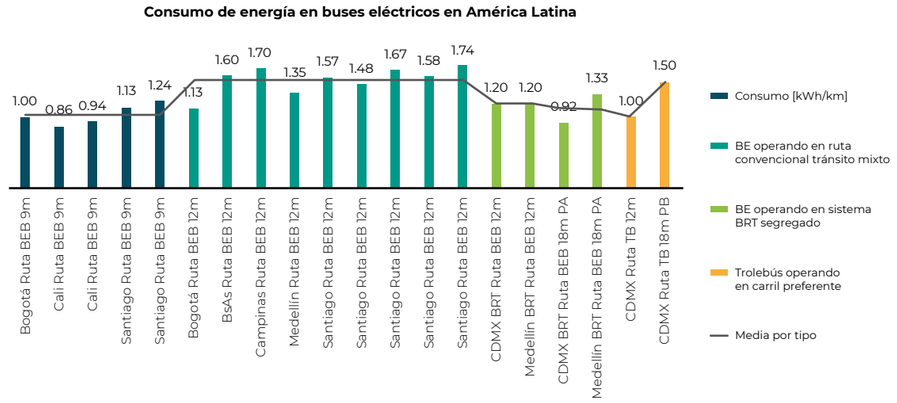
La experiencia en ALyC y el resto de los lugares en donde se operan vehículos eléctricos, ha permitido establecer algunas expectativas al respecto del consumo energético de los autobuses eléctricos. Aun así, es importante no perder de vista que ciertos factores lo-

cales podrían alterar significativamente los rangos de consumo energético observados en otras ciudades.

Usando como referencia los autobuses de 12 metros en ALyC, se puede decir que, aunque la promesa comercial de las empresas fabricantes de vehículos eléctricos establece que los vehículos tendrán un consumo igual o menor a 1 kWh/km, este no es alcanzado en condiciones de operación convencional de rutas urbanas, - algunos vehículos de otras tipologías en otras condiciones de operación (BRT) logren este consumo en pocas ocasiones.

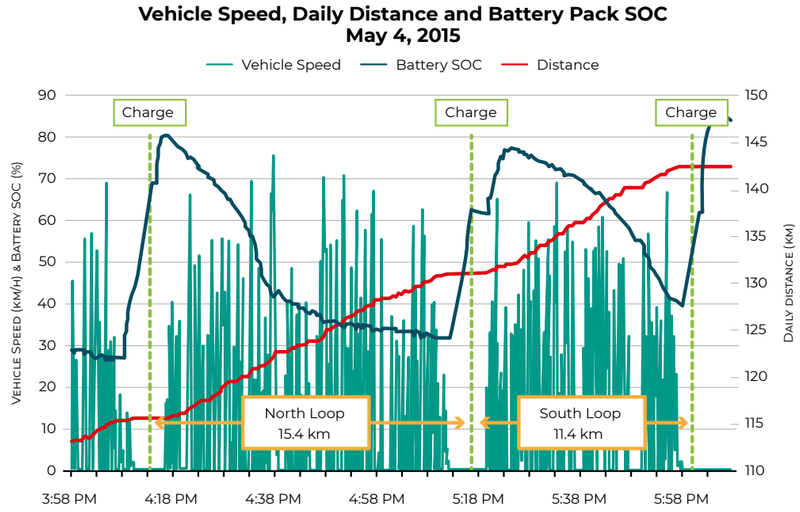
En América Latina, se observa un consumo energético dentro del rango de 1.1 – 1.8 kWh/km (Figura 14), en circunstancias de rutas urbanas de pasajeros sin aire acondicionado. El uso de aire acondicionado puede variar significativamente el consumo energético, donde se han observado registros de consumos energéticos superiores a los 2 kWh/km.

Figura 14 Factores de consumo energético por km en flotas de ALyC



Debido al riesgo que puede representar la variación del consumo energético en la etapa de planeación para el cumplimiento de las programaciones de servicio y para los costos de operación del sistema, diversas técnicas están disponibles y han sido puestas en práctica para la definición de parámetros de consumo energéticos en esta etapa del proyecto:

Figura 15: Velocidad del vehículo, SOC del paquete de baterías y distancia para una "recorrido típico" en la Línea 291 de la ciudad de Foothill con tres eventos de carga mostrados



Fuente: Hanlin et al., 2018

1. Simulación del consumo energético de los vehículos. Los componentes de los vehículos eléctricos son relativamente sencillos de predecir en sus consumos energéticos, cuando se conocen las condiciones de operación más relevantes.

   Para ello, diversos sistemas realizan levantamientos detallados del perfil de ruta y ciclo de manejo en las rutas estudiadas y los usan para estimar consumos energéticos con modelos de comportamiento de los vehículos eléctricos, desarrollados previamente o en cada ocasión. Estas técnicas de simulación del consumo energético de los vehículos eléctricos han mostrado efectividad y precisión, motivo por el cual ésta se ha generalizado rápidamente en ALyC.

2. Pruebas piloto de vehículos: Una alternativa para conocer el comportamiento de los autobuses eléctricos en las rutas previstas para su operación, es realizar pruebas con vehículos incorporados temporalmente a operación o bajo protocolos de prueba específicos. Esta alternativa requiere, en primer lugar, contar con un vehículo para esta actividad. Sin embargo, en diversas condiciones esto ha podido ser ejecutado. En algunas ocasiones las empresas fabricantes de vehículos cuentan con vehículos de prueba que son puestos a disposición de las ciudades para su prueba en operación.

3. Establecimiento de ciclos de manejo estandarizados y homologación de vehículos previo a su adquisición o incorporación a la operación. A nivel nacional o regional, es importe considerar la definición y homologación de protocolos de prueba de vehículos que permitan a los proveedores someter a sus vehículos a estos ciclos arrojando resultados confiables para las empresas y autoridades de transporte. De esta forma, los estudios de mercado y las ofertas comerciales de las fabricantes de vehículos se encontrarían acompañadas de datos de consumo y desempeño válidos para la planeación de los sistemas en donde estos buses serán implementados.
4. Actualmente, en Chile, el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones cuenta con el Centro de Control y Certificación Vehicular (3CV), encargado de homologar el funcionamiento de los vehículos eléctricos ligeros y pesados en el país. La Figura 16 muestra los resultados publicados por este centro para el desempeño de los autobuses eléctricos homologados para operación en el país.

Figura 16 Consumo energético de BEB, homologados por el MTT para transporte público en Santiago, Chile,

CONSUMO ENERGÉTICO BUSES PROPULSIÓN ELÉCTRICA
TRANSPORTE PÚBLICO URBANO SANTIAGO

Bus			Capacidad Baterías [kWh]	Capacidad Pasajeros	Consumo [kWh/km]	Autonomía [km]
Clase	Marca	Modelo				
B2	BYD	K9 FE	276,5	81	1,57	176,1
B2	YUTONG	ZK6128BEVG	324,4	87	1,48	219,7
B2	FOTON	eBus U12 QC	151,55	90	1,67	90,9
A1	BYD	K7	156,6	45	1,13	138,6
A1	FOTON	eBus U8,5 QC	129	47	1,24	104,0
B2	ZHONGTONG	LCK6122EVG	351,237	88	1,58	222,3
B2	KING LONG	XMQ 6127G PLUS	374,65	90	1,74	215,0

Fuente: Ministerio de Energía, 2021

Rango operacional confiable

Los análisis descritos anteriormente, permitirán estimar un rango de operación confiable, con el cual podrán realizarse las planeaciones operativas de los vehículos. La estimación de este rango debe considerar los siguientes elementos:

1. Rango útil o ventana de SOC útil de batería (ver capítulo 3.b Baterías)
   1.1 Capacidad nominal de la batería
   1.2 Límite inferior de carga, para preservar la vida de la batería y como medida de gestión de riesgos operativos
   1.3 Degradación de la capacidad de la carga a lo largo de la vida útil batería
2. Determinación de un consumo energético (ver capítulo 4.c Planeación operativa y energética)
3. Determinación del rango operativo confiable (distancia).

Tiempos y comportamientos de la recarga

Como se ha mencionado, cada autobús eléctrico tendrá una estrategia de recarga asociada a su operación, de acuerdo con los cargadores y baterías provistos o especificados por la empresa fabricante. La Tabla 3 muestra el cruce de diferentes rangos de potencia de cargadores y tamaños de las baterías, mismos que determinan los tiempos de recarga aproximados para completar el 100% de la recarga de una batería.

Tabla 3 Tiempo de recarga en horas, del 100% del SOC de una batería de acuerdo con su capacidad energética y potencia del cargador

Cargador eléctrico		Capacidad energética de la batería (kWh)						
Potencia (kW)	Tipo de cargador	125	180	210	280	320	350	690
25	Conector	5:00	7:12	8:24	11:12	12:48	14:00	27:36
80	Conector / Pantógrafo	1:33	2:15	2:37	3:30	4:00	4:22	8:37
100	Conector / Pantógrafo	1:15	1:48	2:06	2:48	3:12	3:30	6:54
150	Conector / Pantógrafo	0:50	1:12	1:24	1:52	2:08	2:20	4:36
300	Pantógrafo	0:25	0:36	0:42	0:56	1:04	1:10	2:18
450	Pantógrafo	0:16	0:24	0:28	0:37	0:42	0:46	1:32
600	Pantógrafo	0:12	0:18	0:21	0:28	0:32	0:35	1:09

Fuente: Autores

Durante el análisis operativo estos tiempos deberán ser incorporados a la programación de servicio del vehículo. Un resultado viable es aquel en el que, el programa de servicio de los autobuses permite que el vehículo realice recargas suficientes para mantener niveles de carga (SOC) para completar la operación de forma sostenible.

Balance energético del vehículo durante su ciclo de operación.
Con los insumos anteriores, es posible realizar el análisis de viabilidad de la operación de una cierta flota de autobuses en un contexto o ruta de operación.

Es normal que en la operación de rutas urbanas existan ocasiones en que los vehículos de combustión interna son programados para efectuar programas de servicio que les exigen hasta 20 horas de operación diaria y rangos de servicio superiores a los 300 km.

Estas condiciones son difícilmente alcanzables por los autobuses eléctricos de baterías comercialmente disponibles. Sin embargo, existen alternativas operativas para la implementación de autobuses eléctricos:

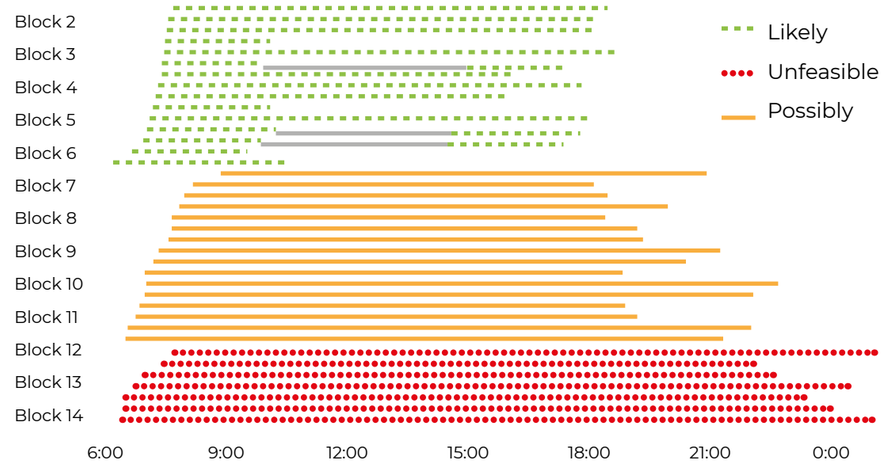
1. Encontrar nichos en los servicios en los que las tecnologías se puedan utilizar exitosamente, basándose en el análisis de sus características operativas.
2. Realizar un diseño detallado de la logística y requerimiento de operación, sin perjudicar el servicio o al usuario, en sistemas o servicios que tengan un grado de control y estabilidad suficiente para garantizar el éxito del sistema.
3. Realizar una sustitución de vehículos en tasas superiores a 1 (un) vehículo eléctrico por cada vehículo de combustión interna retirado.

Estas 3 aproximaciones a la solución pueden ser ejecutadas de forma progresiva, de esta manera los datos de operación histórica y estable permitirán confirmar la necesidad de aumentar la tasa de sustitución de vehículos para completar la sustitución de la totalidad de la flota eléctrica.

La actividad de análisis de la operación y el comportamiento energético de los autobuses tiene el objetivo de garantizar que los vehículos en estudio serán capaces de completar la operación requerida. Para ello este análisis debe realizarse ruta a ruta, o por “bloques” de operación al interior de una flota o una ruta.

Evidentemente existen bloques de operación y rutas que presentan una mayor viabilidad de operación debido a que cuentan con un horario de operación más corto, un menor kilometraje de servicio o porque requieren de la operación discontinua de vehículos, que permite alternar aquellos vehículos con más o menos carga remanente (SOC) para completar la operación. La Figura 17 ilustra diferentes tipos de ruta o bloques de servicio de acuerdo con la posibilidad de ser operadas con buses eléctricos.

Figura 17 Ejemplo de selección de bloques para rutas que son probables (verde), inviables (rojo) y posiblemente (amarillo) capaces de ser completadas por ZEB.



Fuente: Linscott Meredith, 2021

Diseño de servicio, consumo energético y perfil de recarga de vehículos
Este proceso permite obtener un programa de servicios que incorpora el programa de operación, el consumo energético esperado de la ruta y los requerimientos del sistema de recarga. Este diseño de operación permitirá contar con los siguientes resultados intermedios del proceso de planeación;

1. Programación de eventos de recarga para una flota determinada.
2. Número de cargadores mínimos necesarios.
3. Consumo energético esperado de la operación (kWh).
4. Perfil de potencia requerido por la estrategia de recarga (kW).

Las Figura 18 y Figura 19 muestran dos ejemplos de preparaciones de un diseño de servicio y los requerimientos energéticos y del sistema de recarga. Como se puede apreciar, a mayor nivel de detalle en la información es posible obtener resultados más precisos, así como también es posible optimizar los recursos necesarios para la implementación de la flota eléctrica en cuestión.

Figura 18 Ejemplo1. Planeación básica de implementación de flota eléctrica para un conjunto de rutas

Ejemplo de planeación básica de implementación de flota eléctrica para un conjunto de rutas

A. Resultados del estudio de Mercado: Vehículo objetivo - características medias de mercado (insumos del estudio de mercado)

	A.1	A.2	A.3	A.4	A.5	A.6
Tipología	**Capacidad de batería**	**SOH largo plazo**	**SOC límite inferior**	**Rango útil de la batería**	**Tipo de batería**	**Potencia de carga**
	kWh			kWh		
9 metros	320	80%	15%	208	Lenta	kW 80

B. Características de las rutas analizadas (insumos del estudio operativo)

		B.1	B.2	B.3	B.4	B.5
Ruta	**Tipo de vehículo**	**Flota**	**IRD***	**Inicio de servicio**	**Fin de servicio**	**Ventana de pernocta****
		buses	km-día			
Ruta 1	9 metros	55	200	4:00	0:30	3:00
Ruta 2	9 metros	48	176	4:30	23:00	5:00
Ruta 3	9 metros	25	170	4:30	23:00	5:00

C. Análisis operativo básico (consumo energético obtenido de modelación de ruta)

		C.1	C.2 = B.2 x C.1	C.3 = C.2 vs A.4	C.4 = C.2 vs A.4	
	Ruta	**Consumo energético**	**Capacidad de batería requerido**	**Suficiencia de rango útil de batería**	**Viabilidad**	
		kWh/km	kWh			
	Ruta 1	1.10	220.0	Insuficiente	Media	
	Ruta 2	1.16	204.2	Suficiente	Alta	

Ejemplo de planeación básica de implementación de flota eléctrica para un conjunto de rutas

Ruta 3	1.35		Insuficiente	

D. Análisis de dimensionamiento de punto de recarga (escenario uniforme distribuido en el tiempo)

		D.1 = C.2 x B1	D.2 = D.1/B.5	D.3	D.4 = D.2 + D.3
	Ruta seleccionada	**Consumo diario**	**Potencia media requerida**	**Factor de holgura de potencia****	**Pico de potencia requerido**
		kWh	kW		kW
	Ruta 2	9,799.68	1,959.94	25%	2,449.92

E. Análisis de dimensionamiento de cargadores

	Alternativa 1: Dimensionamiento por potencia de cargadores		Alternativa 2: Dimensionamiento por número definido de cargadores	
	E.1.1 = D.2 / A.6	E.1.2 = A.6	E.2.1 = B.1	E.2.2 = .D2 / B.1
	Número mínimo de cargadores	**Potencia por cargador**	**Número de cargadores**	**Potencia mínima por cargador**
	Cargadores	kWh	*Cargadores*	*kW*
	25	80	48	41

*IRD: índice de recorrido diario por bus
**Ventana de pernocta: se descuentan 30 minutos de tiempo de recorrido entre las terminales y los puntos de pernocta
***Factor de holgura de potencia: consulte con su empresa de energía para determinar un factor de holgura que brinde seguridad a la operación de la infraestructura de recarga

XXX Cálculos

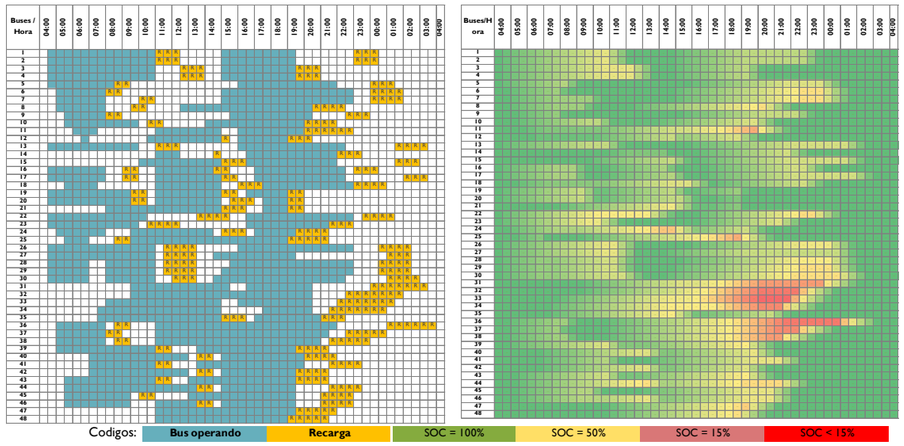
Fuente: Autores

Figura 19 Ejemplo2. Planeación detallada de implementación de flota eléctrica para una ruta definida

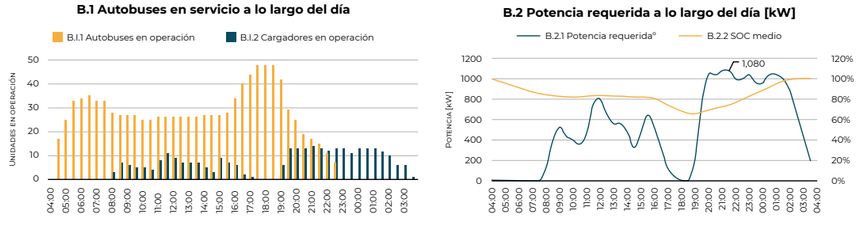
A. Programación detallada de la operación de los 48 buses de la Ruta 2 (programación de servicio + programación de eventos de recarga y validación de viabilidad enerfetica por vehículo)

A.1 Programación detallada de flota

A.2 SOC de la flotapor bus



B. Análisis de dimensionamiento de cargadores e infraestructura de recarga (programación de servicio + programación de eventos de recarga y validación de viabilidad energética por vehículo)



C. Resultados agregados del análisis
(provienen del diseño de servicios) (provienen del diseño de incorporación del sistema eléctrico)

C.1	C.2 = F (A.1)	C.3 = f (A.1)	C.4 = Max B1.2	C.5 = f (A.1)	C.6 = Min A.2	C.7 = Min 8.2.2
Flota	**IRD***	**Tiempo medio de operación**	**Máximo de cargadores**	**Consumo energético diario**	**SOC mínimo**	**SOC medio de la flota mínimo**
	km.día	kW		kW h		
	C.1	C.2 = Max B,2	C.3	C.4 = C.2 + C.3	C.5	
	Ruta seleccionada	**Potencia media requerida**	**Factor de holgura de potencia****	**Pico de potencia requerido**	**Optimización vs diseño básico**	
		kW		kW		
	Ruta 2	1,080.00	25%	1,350.00	45%	

*IRD: índice de recorrido diario por bus
**Factor de holgura de potencia: consulte con su empresa de energía para determinar un factor de holgura que brinde seguridad a la operación de la infraestructura de recarga

XXX Cálculos

Fuente: Autores

Análisis de consumo y demanda de energía eléctrica.

En esta etapa, se requiere analizar detalladamente el impacto del sistema de transporte eléctrico planeado en la red de distribución de energía, así como la infraestructura requerida, para lo cual es indispensable que las empresas de energía eléctrica participen de la validación de los planes emprendidos por las autoridades y empresas de transporte.

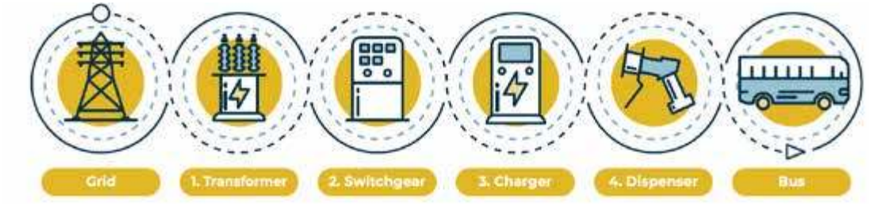
La operación de uno o más cargadores de forma simultánea requiere de infraestructura de soporte adecuada. Esto quiere decir, una nueva subestación o transformadores al interior del patio, así como canalizaciones y cableado dedicado, mismos que requerirán ser diseñados e instalados. El costo de estas obras estará en cada caso en función del diseño definitivo de la instalación eléctrica y sus obras asociadas.

En muchos casos, los patios de encierro o las terminales de las rutas urbanas se conectan a las redes de baja tensión de distribución de energía eléctrica, de forma semejante que otras conexiones comerciales. En estos casos, la introducción de autobuses eléctricos en un depósito puede significar actualizaciones necesarias en las subesta-

ciones primarias y secundarias, así como en la red de media y alta tensión (Element Energy, 2018).

La Figura 20 muestra los componentes generales de la infraestructura necesaria para lograr la transmisión de energía desde la red de transmisión de energía hasta el autobús.

Figura 20 Esquema general de los puntos de recarga de baterías: Red de distribución, transformador, caja de interruptores, cargador, conector, autobús.



Fuente: (Linscott Meredith, 2021

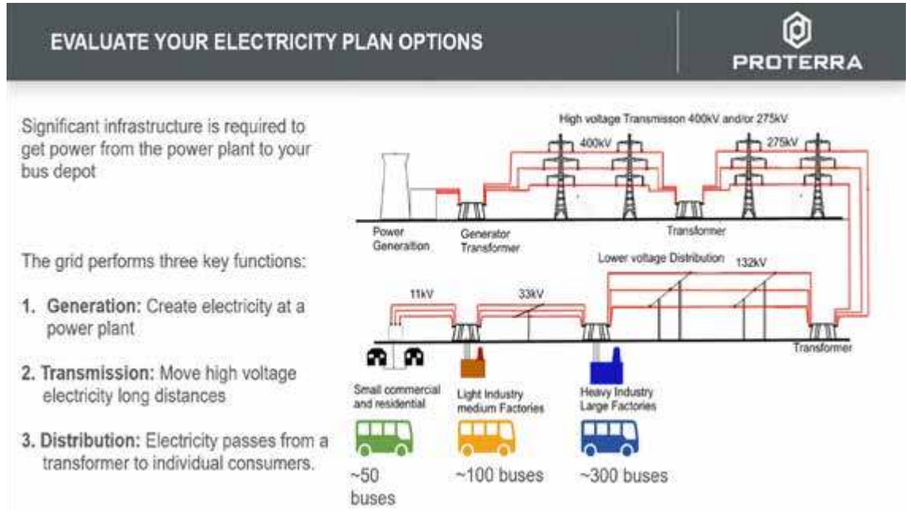
Adicionalmente, el volumen del consumo de energía y la demanda de voltaje requerida por el nuevo punto de recarga pueden modificar la categoría como consumidor. Los cambios en la categoría de los consumidores de energía eléctrica traen consigo nuevas tarifas de conexión y de consumo energético, así como nuevas normativas aplicables.

Conexión a la red de distribución de electricidad.

El número y características de cargadores necesarios permitirán conocer la potencia y demanda de voltaje requerida en el sitio de recarga. Estos parámetros permitirán a la empresa de energía eléctrica definir el punto de la red de distribución del cual se desprenderá la conexión para el punto de carga.

De manera general, la nueva conexión puede realizarse a cableados de alta, media o baja tensión. Cada uno de estos tipos de líneas de alimentación presentan diferentes costos de conexión, requerimientos de subestaciones o transformadores y tarifas de consumo eléctrico, las cuales impactarán de manera directa en el costo total de propiedad de la flota de autobuses eléctricos.

Figura 21 Alternativas de conexión a la red de suministro de electricidad y diagrama genera de una red de generación, transmisión y distribución eléctrica.



Fuente: Lalljie, 2018

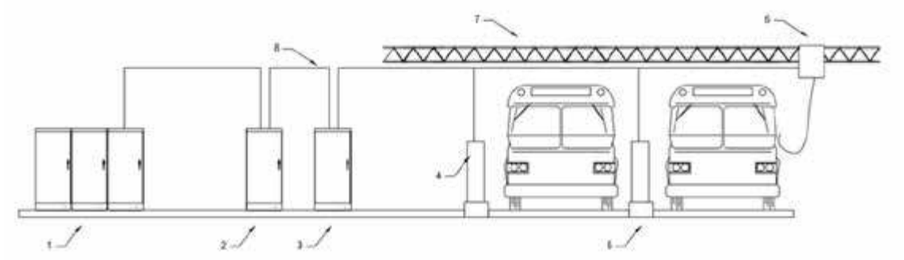
Así mismo, es posible que de acuerdo con las normatividades locales el punto de recarga sea catalogado dentro de una categoría denominada “consumidor primario, o gran consumidor”, que a su vez tendrá impacto en las tarifas de consumo energético.

Diseño o adecuación de los patios o puntos de recarga

Como se ha descrito anteriormente, es posible que los patios de encierro requieran de equipamiento e infraestructura adicional en función del tamaño de la flota y el dimensionamiento especifico de sus necesidades de recarga.

Algunos componentes básicos de estas adaptaciones de los puntos de recarga se describen en la Figura 22.

Figura 22 Ejemplo de componentes principales de la infraestructura eléctrica de carga en patio.



1. Subestación de media tensión, 2. Tablero de distribución de energía con conexión de generación móvil, 3. Unidad de potencia, 4. Pedestales de cargadores, 5. Separadores de posiciones de carga, 6. Cargadores aéreos/elevados, 7. Soporte de techo, 8. Conductos y rieles de desplazamiento.

Fuente: Dana Lowell, Dave Seamonds, 2020

Además de los costos por la adecuación de la infraestructura eléctrica del patio, pueden ser necesarias algunas otras modificaciones. El caso de la empresa Go-Ahead London que compró 46 autobuses eléctricos a batería en 2016, se encuentra ampliamente documentado y muestra como además de la planificación e implementación de la infraestructura de carga, el espacio físico también representó un desafío. Con la instalación de los cargadores, la distribución de espacios del patio tuvo que ser reorganizado, modificando las zonas de maniobras y estacionamiento del vehículo, debido a la necesidad de más espacio para cada vehículo. Un impacto directo que tuvo esto en la operación fue que, con estos cambios de diseño, el acomodo del vehículo presenta nuevas restricciones, ya que antes los conductores podían dejar los vehículos escogiendo la posición de estacionamiento al azar. Como consecuencia la empresa tuvo que implementar un sistema de gestión del estacionamiento y recarga de los vehículos (Randhahn & Knote, 2020).

Como se mencionó anteriormente, los desafíos en cuanto al espacio físico pueden surgir por dos motivos. En primer lugar, la instalación de subestaciones eléctricas o transformadores requiere de espacios físicos que pueden variar significativamente de acuerdo con el número de cargadores y la potencia y demanda de energía eléctrica requerida. En segundo lugar, por motivos logísticos, es decir, la ubicación de puntos de carga signifique la modificación del circuito operativo diario de los vehículos para cierre

e inicio de operaciones; esto puede suceder normalmente en casos en donde no exista un cargador para cada vehículo, instalado en su posición de estacionamiento, y por tanto deba implementarse una “zona de carga”. A continuación, se muestran algunos ejemplos de espacios dispuestos para instalación de cargadores y subestaciones eléctricas en patios y terminales.

Figura 23 Distribución de Terminal y Patio UDM, Metroplús, Medellín. Ejemplo de Terminal y patio de encierro con puntos de carga de vehículos eléctricos en Colombia.



Perímetro de la terminal y patio UDM; 4 posiciones de cargadores;
Espacio de autobús; cargador; subestación

Fuente: Autores con base en Google maps

Perfil de potencia de la estrategia de recarga.

Adicionalmente a los picos de potencia y la demanda de voltaje requerida por el punto de recarga, el perfil de potencia requerido por la estrategia de recarga es relevante en dos sentidos:

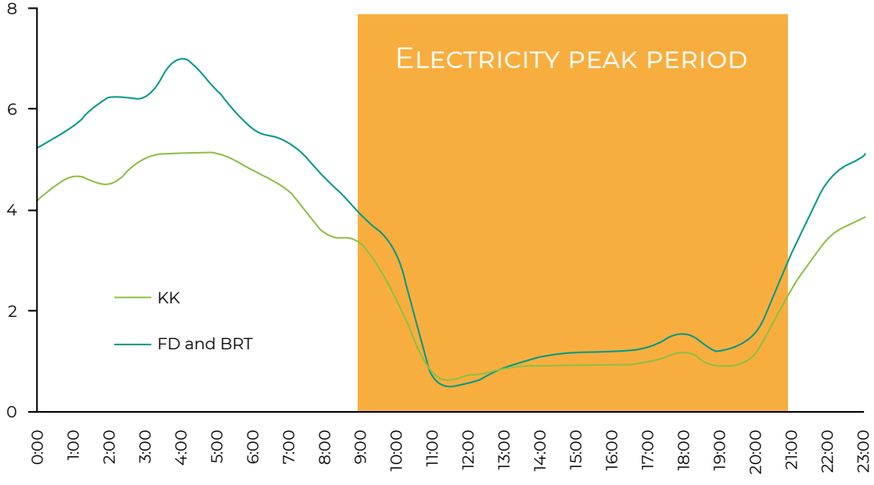
1. En primer lugar, el perfil de potencia es necesario para que la empresa de energía analice la demanda de energía en los puntos de posible conexión a la red de distribución de todos los clientes en conjunto. En general, los autobuses eléctricos concentran sus actividades de recarga y, a su vez el pico de potencia requerido, durante

la noche, mientras que la demanda de energía de las zonas urbanas crece a lo largo del día. Aunque este es un comportamiento generalizado, el comportamiento de consumo eléctrico de ambos segmentos deberán analizarse específicamente para el proyecto en cuestión con el objetivo de prever la sobrecarga del tramo de red a la que se conecte el proyecto.

2. En segundo lugar, el consumo eléctrico puede tener tarifas variables. En general las empresas de energía cobran un valor más alto por el kWh consumido durante el horario pico de consumo. Esta condición da al proyecto un nuevo parámetro de optimización que debe ser estudiado para mejorar los resultados financieros.

La Figura 24 muestra un perfil de potencia proyectada para la operación de la recarga de una flota de autobuses eléctricos en dos patios alternativos, comparándolos con el periodo pico de consumo eléctrico.

Figura 24 Ejemplo de perfil de carga proyectada durante la semana, para escenarios de recarga en dos depósitos del Milwaukee County Transit System.



Fuente: Dana Lowell, Dave Seamonds, 2020

Costos del modelo de consumo energético

En su conjunto estas características determinarán los costos de implementación y operación de los puntos de recarga.

1. Un arreglo común en la distribución de la propiedad y responsabilidad de estos equipos es que las empresas de electricidad sean responsables por la conexión a la red, de la subestación y transformadores, mientras que la empresa operadora o agencia de transporte sea responsable de los interruptores, canalizaciones internas del patio, cargadores y otros activos (Linscott Meredith, 2021).
2. En esta misma distribución de roles, las inversiones necesarias para la conexión a la red de distribución pueden ser trasladadas al proyecto mediante la tarifa de consumo eléctrico o mediante un costo directo de implementación.
3. Los costos de adecuación interior de los patios suelen ser parte de las inversiones necesarias para la implementación de los vehículos eléctricos, que deberán ser asumidas o financiadas dentro del modelo de negocio del proyecto.

05

Operación

A. Fase preoperativa

Protocolos de prueba y aceptación de vehículos

La literatura e incluso las normativas aplicables a la operación de vehículos de transporte público sugieren y requieren la supervisión de la fabricación y prueba para recepción de las flotas de vehículos adquiridas. Es decir, ésta no es una práctica ajena al sector.

Sin embargo, en el caso de los vehículos eléctricos algunas recomendaciones específicas deben ser consideradas.

1. Debido a la estrecha relación que guardan la planeación de la operación y el desempeño y las características energéticas del vehículo y sus baterías, como factores de éxito del proyecto; en el caso de los EVs, los protocolos buscan en general verificar el rendimiento real del autobús y el cumplimiento del resto de las características comprometidas en el contrato.
2. Un objetivo adicional de estas pruebas, especialmente cuando la implementación de vehículos y sistemas de recarga son realizados por diferentes actores, es probar la compatibilidad y correcto funcionamiento de la estrategia de recarga con los vehículos eléctricos.

En la experiencia reciente, los proveedores de vehículos buscan evitar la realización de pruebas de desempeño en los vehículos eléctricos, particularmente en los casos en los que se opta por realizar la compra de los autobuses en lugar de su arrendamiento o los modelos de donde se implementa un actor proveedor de flota. Esto puede deberse a que, en la etapa de entrega de la flota, los proveedores buscan evitar conflictos y posibles penalidades por incumplimientos o diferencias en las características de desempeño prometidas de los autobuses.

Sin embargo, dependiendo de cómo se encuentren estructurados los contratos y modelos de implementación del proyecto, es posible que los resultados de algunas de estas pruebas no se consideren criterios de aceptación de los vehículos. De cualquier forma, los resultados son necesarios para refinar los programas de servicio en anticipación a la operación real de la flota.

Por estos motivos, es importante asegurarse desde la etapa de convocatoria y firma de los contratos que los criterios de aceptación y compromisos de prueba de los autobuses se encuentren discutidos, aceptados y firmados por los proveedores de los vehículos.

En general, los protocolos de prueba de vehículos se organizan de la siguiente manera:

1. Por fase de producción

    1. Pruebas tipo: Se realizan a un solo vehículo, en general cabeza de serie, para verificar el cumplimiento de especificaciones del contrato y funcionamiento, así como el cumplimiento de las regulaciones nacionales e internacionales.
    2. Pruebas serie: Verificar cumplimiento de requisitos y especificaciones, así como igualdad de operación del conjunto de vehículos entregados. En general son pruebas críticas para operación y seguridad.
    3. Pruebas para la recepción de vehículos eléctricos. Verifican el cumplimiento de las condiciones contractuales, y del estado general del funcionamiento y la calidad de la flota y sistema de recarga. (entrega – recepción)

2. Por tipo de vehículo

    1. Generales flotas de autobuses
    2. Pruebas estáticas
    3. Pruebas dinámicas

3. Específicas para autobuses eléctricos: Permiten comprobar el funcionamiento y desempeño del vehículo, sus subsistemas y sus funcionalidades; al mismo tiempo que permiten probar los sistemas de baterías y recarga de vehículos, considerando condiciones de estrés, previo a recepción de la flota.

    1. Pruebas de verificación del cumplimiento y funcionamiento de los vehículos eléctricos y baterías
    2. Pruebas del sistema de recarga.

Capacitación del personal

Un apropiado proceso de capacitación y entrenamiento de personal debe ser implementado en conjunto con los autobuses eléctricos. Esto garantizará una operación segura y más eficiente, al mismo tiempo que permitirá al personal de la empresa operadora y otros actores involucrados un desarrollo profesional y la apropiación del proyecto.

Diversos elementos son necesarios como parte de la cultura de operación de una empresa operadora que implementa vehículos eléctricos. Es importante que las empresas proveedoras de todos los activos tengan obligaciones contractuales para la provisión de capacitación al personal de la empresa operadora. Las especificaciones del contrato deben incluir requisitos para las horas de capacitación, ayudas, materiales, herramientas y equipo de diagnóstico, y la obligación de capacitar replicadores (capacitar al capacitador).

Así mismo, se recomienda que los entrenamientos necesarios sucedan de forma previa al inicio de operación.

Contenidos de los entrenamientos sugeridos

Algunos elementos de capacitación sugeridos por la literatura disponible son los siguientes:

1. Nuevos requerimientos de planeación y ejecución de la operación.
2. Funcionamiento general y específico de los autobuses y cargadores, sus funciones y lecturas tales como como el SOC de la batería, tiempo de funcionamiento restante, rango estimado y otros.
3. Notificaciones y alertas que pueden ocurrir durante la operación.
4. Procedimientos de actuación en casos de alertas de seguridad de los equipos.
5. Conducción eficiente de vehículos eléctricos y uso del freno regenerativo. Es importante destacar que los hábitos de conducción pueden afectar significativamente el rendimiento de los autobuses.
6. Conducción segura y conducción defensiva especialmente en el marco de las características de menor ruido de los nuevos vehículos.
7. Seguridad en la operación, mantenimiento e inspección de baterías y cargadores:

    1. Descripción general de los peligros asociados con los cargadores y baterías
    2. Manejo seguro y desactivación de componentes de alto voltaje, equipo de protección (EPI) para diferentes tareas y tiempo de descarga de condensadores.
    3. Procedimientos de bloqueo y etiquetado para trabajar en componentes y sistemas energizados.
    4. Riesgos de seguridad específicos de la batería, como electrocución, arcos eléctricos e incendios por cortocircuito.
    5. Ubicación de interruptores de corte de emergencia y equipo de respuesta a incendios.
    6. Acciones para evitar una emergencia y procedimientos de respuesta ante emergencia.



Conductora de buses eléctricos en Santiago de Chile.
Fuente: Mónica Araya, @MonicaArayaTica

b. Levantamiento de líneas base

Un aspecto que no puede dejarse pasar antes de iniciar el servicio con los nuevos autobuses eléctricos es la medición de una línea base para un conjunto de aspectos relevantes definidos para la evaluación del desempeño y éxito del proyecto.

Con la entrada de operación del sistema y desde un cierto plazo anterior al inicio formal del servicio, muchas de las condiciones del servicio se verán modificadas. Por este motivo es importante contar con un plan de establecimiento de una línea base, considerando los siguientes aspectos:

- Tiempos necesarios para la recolección de datos.
- Metodología de levantamiento de información y diccionarios de variables que consideren la etapa de monitoreo, es decir considerar la información que existirá en la siguiente etapa del proyecto para garantizar que se contará con datos comparables
- Apropiada documentación y resguardo de la información hasta su uso en la etapa siguiente del proyecto.

Algunos criterios para considerar en la línea base del servicio son:

- Las medidas de desempeño operativo que permitirán realizar comparaciones de nivel y confiabilidad del servicio, así como estimar otras variables que pueden ser parametrizadas mediante indicadores de oferta.
- Satisfacción y opinión y apropiación de las personas usuarias hacia el sistema.
- Fallas y problemáticas recurrentes
- Factores de emisión
- Mediciones de calidad del aire y ruido

c. Cambios en la operación cotidiana

Conforme se consolidan las flotas de autobuses eléctricos en la región y en el mundo entero, se genera más información respecto a la etapa de operación y es compartida con investigadores y potenciales nuevos operadores de estos vehículos. Hasta el momento la opinión sobre el desempeño de los vehículos es positiva, en la medida que aumenta el número de las ciudades que buscan aumentar su volumen de autobuses eléctricos en el corto plazo. Así mismo, encuestas realizadas a los operadores confirman que las operaciones de autobuses eléctricos de baterías se desarrollan sin problemas, y con un funcionamiento adecuado de los vehículos (Hanlin et al., 2018).

Algunos elementos necesarios para considerar durante la etapa de operación de la flota se presentan en este apartado.

Durante la etapa de operación, es normal que se continúen las actividades enfocadas a monitorear y mejorar el rendimiento de los vehículos, así como de optimizar la estrategia de carga y operación. Esto es debido a múltiples factores:

1. Acostumbrase a la conducción de los vehículos eléctricos a la totalidad de la plantilla de conductores y optimizar el consumo energético de los vehículos lleva tiempo.
2. Optimizar la estrategia de carga en conjunto con la operación también puede requerir de un plazo de estabilización del servicio y de un aprendizaje continuo sobre los vehículos.
3. Posteriormente, la degradación natural de las baterías hace que sea necesario adaptar los planes de operación continuamente.
4. Adicionalmente, la entrada de nuevos vehículos eléctricos y posiblemente de sistemas de recarga, puede implicar alternativas a los planes de operación.
5. Uno de los cambios más importantes en la operación cotidiana, es la transición a las nuevas prácticas de planeación operativa y energética de las actividades del vehículo (operación) y de la recarga (preparación diaria de la operación). Sin duda al-

guna, ésta es una dinámica que no sucedía en la práctica diaria de muchos sistemas de transporte. Aunque de alguna forma, es similar a la programación de servicio de vehículos Gas Natural, cuyos tanques en muchos casos no les permiten cumplir con la una jornada diaria completa (rangos de operación de 160 – 180 km).

En este proceso algunas acciones son recomendadas en favor de consolidar una operación más eficiente y sostenible en el tiempo:

1. Implementación de un programa de incentivos a para fomentar la conducción más eficiente y segura.
2. Algunos operadores reportan modificaciones en sus estrategias de recarga buscando mantener el máximo nivel de SOC de la flota posible en todo momento. Esto no solo favorece la salud de la batería (SOH) en el largo plazo, también es un elemento de gestión de riegos frente a interrupciones en el suministro de energía en los puntos de recarga u otras problemáticas con los cargadores.
3. Establecer una unidad de consolidación y análisis de los datos generados por las nuevas flotas de autobuses eléctricos. Esta actividad incluye el análisis estacional e histórico de los consumos de energía de los vehículos que puedan estar asociados al uso de aire acondicionado o sistema de calefacción, variaciones en la congestión vehicular en los recorridos de los vehículos y temporadas de mayor carga de pasajeros principalmente.

d. Monitoreo de la operación

La implementación de sistemas de BEB aún tiene muy pocos antecedentes en los sistemas de transporte de ALyC. Por este motivo, el monitoreo de la operación será una herramienta básica para hacer frente a los retos de estos nuevos proyectos.

El levantamiento y análisis de un conjunto amplio de datos de operación proporciona información sobre el funcionamiento del proyecto y permite entender las posibles variaciones de desempeño. Además, la supervisión, el seguimiento y la generación de informes de datos conducen a la identificación y mitigación tempranas de los problemas de implementación (Linscott Meredith, 2021). En particular algunos aspectos que deben incluirse en la estrategia de monitoreo de la flota son los siguientes:

- Variaciones estacionales del comportamiento del vehículo
- Consumo energético
- Disponibilidad e incidencia de fallas
- Utilización y aprovechamiento de la flota

- Reducción de emisiones
- SOC, SOH y fallas del sistema de baterías y funcionamiento del sistema de recarga (ver Capítulo 5.e Gestión de baterías)

En su conjunto esta información permitirá alimentar de forma más precisa futuros modelos de negocio, conocer la posibilidad de expansión y mayor aprovechamiento de los autobuses, baterías y cargadores, y realizar programaciones de servicio más efectivas y eficientes.

e. Gestión de las baterías

Esta actividad de monitoreo durante la operación de los autobuses eléctricos recibe especial atención por las empresas operadoras.

Como se ha mencionado anteriormente, la capacidad utilizable de las baterías del autobús se degradará con el tiempo, afectando los programas de servicio. Sin embargo, medir con precisión la pérdida de capacidad o degradación de las baterías puede ser difícil. Esto genera dificultades para presentar reclamaciones de garantía relacionadas con la capacidad de la batería.

Algunas agencias de tránsito utilizan servicios especializados para evaluar la capacidad de la batería. También es una opción utilizar los procedimientos de diagnóstico establecidos por la empresa proveedora, siempre que estos hayan sido entregados. En cualquier caso, una prueba confiable requiere de equipo especializado.

En este contexto se recomienda establecer en conjunto con el proveedor una medición de Línea Base de las características generales de funcionamiento de las baterías al momento de la entrega. En consecuencia, diseñar e implementar un plan de monitoreo del SOH de la batería considerando intervalos de medición consistentes (al menos una vez al año).

También, como una herramienta de apoyo a la operación existen aplicaciones de los softwares de monitoreo y control de la flota.

f. Segunda vida de las baterías.

El comportamiento de las baterías en el mediano y largo plazo deja claro que las baterías originales del sistema de transporte deberán ser sustituidas. Una pregunta recurrente es sobre estas baterías y su descarte o segunda vida.

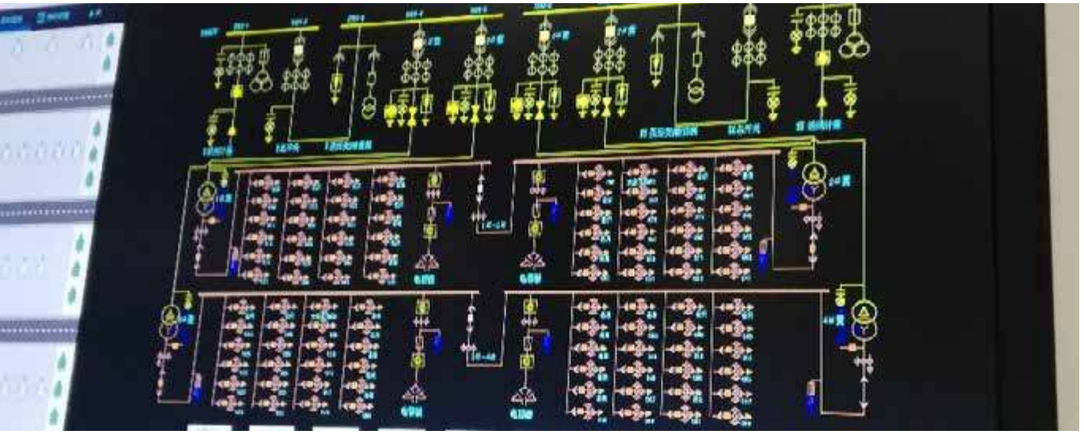
Al respecto la literatura coincide en que las baterías degradadas de un sistema de transporte público pueden perder utilidad para la operación de los autobuses debido a que no permiten un rango de servicio compatible con los programas de servicios. Sin

embargo, esto no quiere decir que no sean útiles para el sistema en su conjunto. Estas baterías aun contarán con una capacidad de almacenamiento energético importante y pueden consolidar bancos de baterías de reserva.

Se estima que en 2025 las baterías de la segunda vida útil pueden ser entre un 30 y un 70 por ciento menos costosas (Engel, Hauke Hertzke & Siccardo, 2019), abriendo una posibilidad para mercados secundarios y nuevos usos. A continuación, se presentan algunos posibles usos de las baterías de segunda vida dentro de los sistemas de transporte.

- Bancos de baterías en patios y puntos de recarga permanentes o emergentes, como respaldo.
- Bancos de baterías para gestión de carga, minimizando el impacto a la red de distribución de energía eléctrica.
- Bancos de baterías para almacenamiento de energía de sistemas de generación de energía solar u otros renovables.
- Baterías de respaldo para vehículos con fallas en sistemas de baterías.
- Reventa.

Pese a esto, ante la incertidumbre del comportamiento de las baterías y su funcionalidad y valor de reventa, en diversos contratos de adquisición de autobuses eléctricos se han incluido clausulas en donde se obliga al proveedor del vehículo y las baterías a hacerse cargo de la logística inversa de las baterías al momento de cumplirse los parámetros mínimos de carga y funcionamiento requeridas por especificación.



Tablero de control del sistema de gestión de carga en patio en Shanghái.
Fuente: Jone Orbea

Sistemas de gestión de carga en patio

Estas herramientas permiten controlar la utilización de los cargadores en el patio, así como conocer el estado de carga de los vehículos. Estas herramientas permiten coordinar y optimizar la logística de recarga de la flota, las cuales se tornan especialmente complejas en la medida que el número de vehículos en un punto de recarga aumenta. También, tienen beneficios directos para la red de distribución de energía pues permiten disminuir los picos de potencia, particularmente para periodos críticas.

Este control permite optimizar el consumo manteniendo las necesidades de carga estables aprovechando las tarifas más bajas y sin sobrepasar la potencia máxima del servicio. Además, permite conocer el estado de la infraestructura adicional y controlar su correcto funcionamiento.

Estas aplicaciones pueden representar costos adicionales pues dependen de algunas interfases de comunicación entre vehículos cargadores y sistemas centrales de control, requiriendo a su vez de nuevas funcionalidades de estos componentes.

Así mismo, los sistemas de movilidad eléctrica pueden fungir como parte del sistema de distribución energética eléctrica. Es decir, ser de utilidad para el sector de energía, debido a que capacidad acumulada de las baterías de una flota de vehículos eléctricos, puede permitir balancear las demandas que se presentan en algunos puntos de la red de distribución de energía eléctrica.

Adicionalmente, esta funcionalidad puede representar ingresos para los sistemas de transporte eléctrico. A este uso adicional de las flotas de vehículos eléctricos se le llama “Vehículo-a-la-red” (por su denominación en inglés “Vehicle-to-grid” o “V2G”). Esta funcionalidad requiere de diferentes niveles de integración (principalmente legal y tecnológica) y una correspondencia en los usos de las baterías con las demandas de la red de energía eléctrica, Se prevé que, en el futuro, estas alternativas de mayor integración entre los sistemas de movilidad y de energía cobren mayor relevancia, aunque ya hay inicios de este tipo de proyectos en algunos países.

Gestión de la carga

Otras aplicaciones disponibles son aquellas que permiten monitorear en tiempo real el SOC de las baterías de los autobuses en servicio.

Este tipo de herramientas se vinculan con las aplicaciones de seguimiento de la programación de servicio e interactúa con el sistema de gestión de la carga en patio, permitiendo realizar asignaciones de cargador a los vehículos de forma automatizada y simplificando la comunicación entre personal de patio y las personas conductoras. Este tipo de software permiten crear estrategias de carga automáticas que facilitan la operación con vehículos eléctricos.



Sistema de control en tiempo real de SOC de baterías en Shanghái.

Fuente: Jone Orbea

A. Interoperabilidad

La interoperabilidad en un sistema de autobuses eléctricos se refiere principalmente a que los equipos de recarga instalados en patios, y eventualmente en vía, sean compatibles con los vehículos, sin limitar la participación de diferentes actores y proveedores en el mercado. Esta condición se logra especificando este requisito en los diferentes contratos de adquisición y diseñando un estándar que reglamente la materia.

Como ya se mencionó, la operación actual de vehículos eléctricos en la región se concentra en rutas urbanas y no en sistemas BRT. Esto ha reducido la presión sobre la interoperabilidad de los componentes de autobuses eléctricos pues los vehículos no comparten sistemas de recarga entre sí y la estrategia de recarga implementada hasta el momento es nocturna en patios, no hay equipos instalados en vía.

Adicionalmente, en la práctica se ha observado resistencias por parte del mercado de vehículos y cargadores avanzar hacia un estándar interoperable en la región. Sin embargo, en la medida en que autobuses eléctricos entren a operar en la región y se requieran periodos de recarga durante el día en patios compartidos, este requisito de interoperabilidad cobrará mayor importancia.

Para garantizar la interoperabilidad, se deben desarrollar estándares de carga para todas las formas de carga de los BEB. Asimismo, se deben establecer pautas de adquisición para BEB e infraestructura de carga similares a las que están disponibles para los autobuses convencionales. En este ámbito es imperante que las autoridades responsables de los sectores transporten y energía a nivel nacional trabajen en conjunto con las autoridades locales, fabricantes de autobuses, proveedores de componentes, y otras organizaciones, de lo contrario, los esfuerzos locales pueden enfrentarse a muchas barreras de mercado.(Linscott Meredith, 2021).

B. Riesgos en la implementación de flotas de autobuses eléctricos

Como en toda implementación de proyecto, es importante conocer los riesgos asociados. Las metodologías de evaluación de riesgos consisten básicamente en los siguientes pasos:

1. Identificación de los riesgos de proyecto
2. Clasificación de riesgos
3. Tipificación del riesgo en términos de su gravedad, frecuencia o probabilidad de ocurrencia.
4. Identificación de las medidas de mitigación de los riesgos identificados.

En el caso de los autobuses eléctricos algunos riesgos percibidos por las agencias de transporte se destacan y son asociados con la posible falta de energía eléctrica para abastecer a los vehículos previo a su operación cotidiana.

Este caso ha sido analizado en diversos sistemas que han implementado flotas eléctricas mostrando con la experiencia que los riesgos de afectaciones graves a la operación por fallas en el suministro energía son en muchos casos realmente bajos. Sin embargo, contar con un plan de gestión de este riesgo en conjunto con la empresa de energía es un punto relevante de resiliencia operativa del sistema:

1. Incidencia de fallas y confiabilidad de la red local de energía: El primer paso para crear un plan de gestión de estos riesgos es comprender qué tipos de interrupciones pueden ocurrir en el área en la que se encuentren los puntos de recarga de la flota. Es posible solicitar la información de fallas e índices de confiabilidad de la red de distribución de energía, así como los tiempos de restauración del servicio durante eventos climáticos importantes (Linscott Meredith, 2021).
2. Estas ocurrencias pueden variar significativamente en diferentes puntos de la misma ciudad y aún más entre ciudades. Las áreas expuestas a huracanes y/o tormentas de hielo o arena pueden ser más vulnerables a cortes más frecuentes a largo plazo.
3. Diversificar los puntos de carga. Una solución al riesgo descrito es contar con más de un punto de recarga de autobuses. En la medida que el sistema crezca y los puntos de recarga se diversifiquen, el riesgo descrito disminuirá de manera significativa. Este aspecto incide en la importancia de contar con estándares interoperables para los sistemas de recarga.
4. Prestación de servicio durante un corte de energía: el estudio de la confiabilidad del punto de carga permitirá estimar una frecuencia y tiempo probable de duración de un evento de corte del suministro eléctrico. En diferentes momentos de la sema-

na o del día pueden requerirse diferentes planes de contingencia de operación, en muchos casos puede no ser necesario reducir la oferta de servicio. En lo casos en donde se cuente con flota mixta (flota de combustión interna, híbridos u otras tecnologías) el resto de la flota podría cubrir satisfactoriamente los planes de operación durante un cierto plazo.

5. Sistemas de respaldo de emergencia. Los planes de gestión de riesgos pueden incluir contar con sistemas de respaldo de generación de energía. Existen diversas opciones para esto (tecnologías capacidades y costos) y se requerirá una evaluación específica para tomar una decisión conveniente para el sistema, que mantenga un apropiado balance entre costo y protección.

06

Mantenimiento

El costo de mantenimiento de una flota de vehículos se compone de varios conjuntos de tareas que buscan mantener el estado operativo del autobús. Para entender el costo total de mantenimiento deben entenderse los diferentes tipos de mantenimiento requeridos: mantenimiento preventivo, mantenimiento correctivo, neumáticos y mantenimiento de la infraestructura de recarga.

Para los vehículos eléctricos, la eliminación del motor de combustión reduce la cantidad de partes móviles de alto desgaste y fricción, que requieren este tipo de mantenimientos. Alrededor del 25% de reducción en los costos de mantenimiento es esperado de acuerdo con referencias bibliográficas y evidencia de casos anteriores (Hanlin et al., 2018). Esto hace que este tipo de vehículos presenten el menor costo de este componente de mantenimiento.

En la consecución de un servicio de mantenimiento apropiado es importante garantizar una correcta entrega de los manuales y transferencia de los conocimientos necesa-

rios para las nuevas actividades requeridas por los vehículos eléctricos hacia la empresa que sea la encargada de esta función. Por otro lado, en la medida en que aumenta el volumen de autobuses eléctricos en la región, aparecen servicios especializados que pueden cubrir esta función.

a. Rutinas de mantenimiento preventivo

Este es el mantenimiento más continuo que se le efectúa a los vehículos. Se apega a un programa de ejecución de tareas o campañas "ligeras" en donde principalmente se consideran cambios de fluidos, filtros y engrase y otras rutinas necesarias según las especificaciones técnicas requeridas por el fabricante de cada vehículo. En el caso del vehículo eléctrico, desaparece la necesidad de, por lo menos, los siguientes requerimientos constantes de mantenimiento preventivo.

1. Revisión y limpieza de componentes y partes móviles y de desgaste.
2. Cambio de lubricantes de motor, transmisión, diferencial y engrasado de partes móviles (en algunos casos).
3. Cambio de filtros de aire, agua, combustible, aceite de motor y refrigerante
4. Cambiado preventivo de juntas
5. Ajustes de motor y otras partes mecánicas y de presión.
6. Reemplazo de componentes con menor vida útil que el motor o el vehículo, como bombas, bujías, cableados, entre otros,

Este cambio tecnológico puede significar una reducción de hasta el 80% de los costos de insumos de lubricantes, filtros y tiempo de mano de obra para rutinas de mantenimiento preventivo en vehículos eléctricos.

b. Mantenimiento mayor y correctivo

De acuerdo con otras experiencias en sistemas integrados de transporte, este costo puede ser muy variable. Se ha podido observar que este costo puede variar entre el 20% y el 80% del costo total de mantenimiento en vehículos de combustión interna, dependiendo de las condiciones de operación de los vehículos, índices de choque, vandalismo y otras características operativas. Sin embargo, este costo mantiene una tendencia creciente a lo largo de la vida útil del vehículo de combustión interna. En este mantenimiento se contempla los siguientes aspectos:

1. Reemplazo de componentes mayores y de piezas de desgaste de largo plazo como son el motor, transmisión, diferencial, muelles o suspensión

2. Tareas de mantenimiento especiales, es decir, con ejecución en intervalos de 100 mil, 350 mil, 500 mil o más km.
3. Mantenimiento de carrocería. El mantenimiento en carrocería está ligado con el área de operación que realiza la revisión de daños de las unidades. Este costo implica la corrección de daños de carrocería ocasionados por vandalismo o accidentes en vía.
4. Reparaciones por falla o mal funcionamiento de piezas, fuera del programa de mantenimiento.

En el caso de los vehículos eléctricos, sus partes básicas para el funcionamiento presentan una incidencia menor de fallas de acuerdo con la evidencia. El tiempo medio de funcionamiento antes de fallo de los motores es de 100 mil horas, equivalente a más de 15 años, equivalente a 200 mil horas de operación, en el caso de los inversores del vehículo se registran periodos entre fallas de 140 mil horas y en el caso del resto de los componentes electrónicos son 180 mil horas(WRI México, 2019).

c. Neumáticos

En este caso también se puede apreciar otra diferencia en los comportamientos de los diferentes vehículos. Principalmente en el caso de los vehículos eléctricos, la experiencia internacional muestra un mayor consumo de llantas debido al mayor torque del motor que implica un mayor desgaste en el arranque de los vehículos y al peso permanente de la unidad. En el caso de la prueba de vehículos eléctricos en el sistema Metroplús de la ciudad de Medellín, se ha evidenciado a través de la operación sostenida de los vehículos un aumento de 10% del desgaste de los neumáticos.

c. Mantenimiento de los sistemas de recarga

Los cargadores y el resto de las infraestructuras de soporte de los sistemas de recarga también deben ser considerados dentro de las tareas de mantenimiento del proyecto. Estos equipamientos requieren de un mantenimiento mínimo. Adicionalmente, éstos generalmente constan de diseños modulares que permiten reemplazar los componentes en mal estado, sin la necesidad de intervenir el cargador u otro equipo en su totalidad (Linscott Meredith, 2021).

Las rutinas de mantenimiento periódico de estos equipos pueden incluir limpiezas generales y de filtros revisión del desempeño eléctrico de entrada y salida, y de las alertas de falla del propio equipo.

07

Impactos esperados y monitoreo

Los impactos de los sistemas de transporte son muchos y muy diversos, generalmente se dividen en directos e indirectos, siendo los primeros los más fáciles de identificar y cuantificar, y por tanto aquellos comúnmente considerados en los estudios de impacto. Mientras que los segundos han sido, en algunos casos, recientemente incorporados a las metodologías de estimación de impactos de los proyectos.



Autobús eléctrico operando al interior de un espacio cerrado en Gotemburgo, Suecia.

Fuente: Autores

Aun es difícil establecer medidas de dimensionamiento de todos los impactos de un proyecto de movilidad eléctrica, sin embargo, a continuación, se mencionan y se describen algunos:

1. Mejoramiento en la calidad del aire, ruido y salud.
2. Mejora en la calidad del servicio y recuperación del transporte público.
3. Reducción de la huella de carbono y desarrollo sostenible.

a. Mejoramiento en la calidad del aire, ruido y salud

Los vehículos eléctricos se destacan de entre otras alternativas de movilidad por tener impactos directos en la calidad de vida de sus personas usarías y otras personas en el

entorno. La ausencia de un motor de combustión elimina la producción de todos los contaminantes que tienen impacto a nivel local (por ejemplo, el monóxido de carbono, el metano, los óxidos nitrosos y el material particulado de baja densidad). La presencia de estos compuestos en el aire que respiran las personas tiene una relación directa con la ocurrencia de enfermedades respiratorias y sus efectos. Las estrategias de mejoramiento de la calidad del aire han demostrado tener impactos positivos en la salud de las personas.

Además, aunque usualmente se reconoce el impacto y los beneficios por la mejora de la calidad del aire, los vehículos electros también tienen un impacto directo en el fenómeno del ruido, que también afecta la calidad de vida de las personas. La contaminación acústica es un problema cada vez más presente en la sociedad moderna y se ha incrementado por el desarrollo de las actividades industriales, el transporte, la construcción y otras. Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), 130 millones de habitantes de sus países miembros, se encuentran expuestos a un nivel sonoro superior a 65 dB –límite superior deseable aceptado por la Organización Mundial de la Salud (OMS)– y otros 300 millones residen en zonas de incomodidad acústica entre 55 y 65 dB.

En términos generales, un autobús convencional provoca una serie de ruidos debido a la combustión de su motor, que oscilan entre los 70 y 80 dB. En cambio, un autobús eléctrico resulta casi imperceptible al oído. Debe también tenerse presente que los efectos que produce la contaminación acústica están en función de la intensidad, la frecuencia emitida y el tiempo de exposición, y que la exposición al ruido tiene afectaciones directas e indirectas.

b. Mejora en la calidad del servicio y recuperación del transporte público

La implementación de flota eléctrica y nuevas tecnologías operativas contribuyen a mejorar la calidad en el servicio y la percepción del usuario.

Diversos proyectos han reportado una alta aceptación de las personas usuarias hacia los autobuses eléctricos. Entre los co-beneficios asociados al cambio de tecnología están (1) la disminución de ruido, (2) mayor confort durante el trayecto debido a la reducción de vibraciones, (3) posibilidad de rediseño del servicio como parte de la planeación urbana, (4) percepción de mayor seguridad asociada a la operación en velocidades reducidas y constantes, y (5) percepción positiva del usuario vinculada una tecnología de menor impacto ambiental.

Todo lo anterior se traduce en una mejor calidad de vida para los usuarios y habitantes de la localidad e indirectamente en una nueva oportunidad de atraer nuevos usuarios al sistema y romper con el ciclo vicioso del deterioro del servicio y la perdida de demanda de los sistemas de transporte público.

c. Reducción de la huella de carbono y desarrollo sostenible

Además de reducir las emisiones con impacto local y en la salud, la adopción de buses eléctricos trae otros beneficios, asociados a la sustentabilidad y seguridad energética. En su funcionamiento, los EVs, son más eficientes que los vehículos de combustión interna, generando una reducción en la producción de gases de efecto invernadero, incluyendo en esta cuenta, las emisiones derivadas de la producción de la energía utilizada. Además, los vehículos eléctricos favorecen los mercados energéticos que actualmente sufren un proceso de transformación a todos niveles, en la búsqueda de un aumento de la capacidad de generación de energía a nivel global, usando la energía renovable.

En resumen, los vehículos eléctricos tienen impactos directos e indirectos en la producción de gases de efecto invernadero, contribuyendo a las metas globales de reducción la huella de carbono.

08

Costo total de propiedad

El Costo Total de Propiedad (CTP) o Total Cost of Ownership (TCO) es una técnica que estima el costo del ciclo de vida de un proyecto. Para un proyecto de autobuses eléctricos, los componentes del TCO pueden ser estructurados de forma general en: 1) costos de capital, 2) costos operación y mantenimiento, así como sus variaciones a lo largo del tiempo y 3) costos de reemplazo (Banco Interamericano de Desarrollo, 2020).

A. Costos de capital

Estos costos son todos aquellos desembolsos requeridos al inicio de un nuevo negocio o proyecto para la compra o adquisición de un activo fijo o para añadir valor a un activo existente.

En este capítulo se estiman los costos de inversión del proyecto de acuerdo con los siguientes conceptos (Linscott Meredith, 2021):

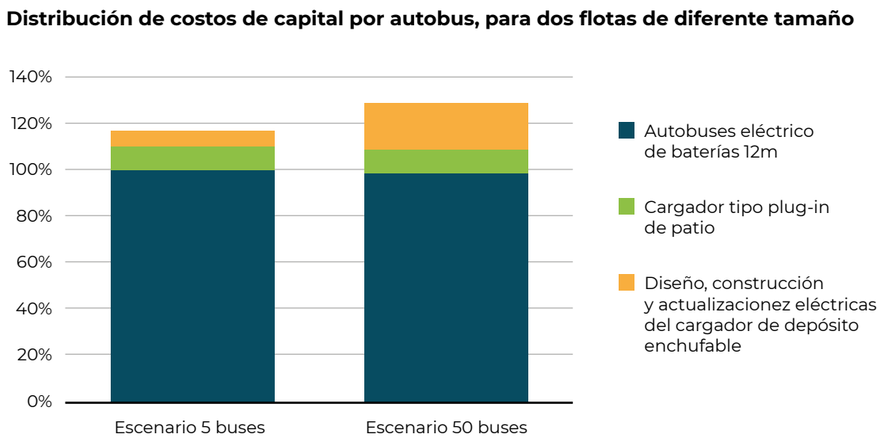
1. Costos de vehículos,
2. Costos de cargadores
3. Costos de instalación de la infraestructura e instalaciones en patios o puntos de recarga
4. Actualizaciones de red de distribución de energía y
5. Modificaciones de las instalaciones de mantenimiento.

Los costos de capital han sido identificados como una de las principales barreras para la introducción de vehículos eléctricos a los sistemas de transporte público debido a los altos precios de los activos en relación con las tecnologías tradicionales de autobuses. Una complejidad adicional en los costos de capital reside en que los costos complementarios al material rodante suelen ser muy variables en cada contexto.

Adicionalmente, algunos estudios sugieren que los costos de instalación de la infraestructura de recarga y las actualizaciones de red de distribución de energía pueden aumentar significativamente a medida que el volumen de la flota que recarga en un solo punto aumente, significando que en cada contexto existirá un tamaño óptimo del punto de recarga desde la perspectiva del costo de implementación.

Aun cuando los pecios de los BEB han permanecido a la baja en los últimos años, el valor observado en ALyC para un vehículo de 12metros se mantienen entre 320 mil y 420 mil dólares. Algunos costos de referencia observados en proyectos de BEB de reciente implantación en la región pueden observarse en la Figura 8 Costo de buses eléctricos de 12 metros en proyectos implementados en América Latina.

Figura 25 Estimaciones de costos para los componentes de implementación de una flota eléctrica de autobuses, en función del costo de admisión del vehículo



Fuente: Autores con base en Linscott Meredith, 2021

En cuanto a la disminución de costos de capital en la medida que se busca implementar vehículos de menor tamaño, en análisis recientes, se puede observar que los costos normalizados por pasajero o kilometro no alcanzan reducciones significativas debido principalmente a que los costos de la infraestructura de recarga y patios se mantienen similares, al mismo tiempo que los costos de las baterías y traslados de los vehículos se mantienen iguales o comparables a los vehículos mayores.

Otros factores que pueden alterar los costos del proyecto son los componentes adicionales, como la tecnología del tren motriz, aire acondicionado, configuración interna (plataforma alta o baja), calidad general del producto y prestaciones adicionales del vehículo, tecnología y funcionalidades de los cargadores, etc. También, en pro del mejoramiento de la calidad del servicio a los usuarios, en los proyectos de autobuses eléctricos se incorporan dispositivos tecnológicos a bordo como pantallas, puertos USB, wifi y otros para mejorar la seguridad como cámaras y sensores, que aumentan los costos iniciales de capital.

Por otra parte, este componente del CTP está bastante afectado por el costo de financiamiento, donde se puede encontrar otra oportunidad para los autobuses eléctricos dado que en el mercado financiero se están ofreciendo tasas de interés más bajas para la movilidad eléctrica. También, como se presenta más adelante, las alternativas de financiación son más numerosas por la creación local o mundial de fondos de inversión destinados a mitigar el cambio climático o directamente a la incorporación de vehículos eléctricos en las ciudades. Este panorama ha mejorado con el tiempo y quedó claramente plasmado en el proceso que vivió Bogotá en el reemplazo de su flota zonal. De 2019 a 2021 las empresas privadas, junto con sus fondos de inversión, se mostraron cada vez más inclinados a ofrecer solo buses eléctricos a la ciudad.

B. Costos de operación

Los costos de operación son los costos de cualquier organización, directamente asociados a la realización de las actividades asociadas al negocio o servicio diario o cotidiano. Estos costos representan la mayor parte de los costos regulares de una empresa, y se diferencian de las inversiones o CAPEX, en que se incurren en ellos dependiendo del volumen de operación, de manera continua y que son objeto de procesos contables y fiscales en ciclos anuales.

Un análisis detallado de estos costos debe realizarse en función de cambios esperados en las condiciones de operación que puedan modificar los costos de producción del servicio. A continuación, se describen los principales conceptos en que pueden ser desagregados los costos de operación, así como su tendencia en comparación contra la operación de flotas de vehículos de combustión interna en servicios comparables.

1. Consumo energético: Los estudios en ALyC apuntan este concepto como el principal medio de reducción de costos debido a la mayor eficiencia energética y las tarifas de consumo eléctrico.
2. Conductores: En un sistema con una plantilla de conductores profesionalizada, el costo de salarios por la labor de conducción no debería variar demasiado. Sin embargo, algunas agencias recomiendan la aplicación de incentivos específicos para conductores de los autobuses que fomenten el cuidado de las unidades, así como su mejor desempeño energético.

- Mantenimiento. Como se ha mencionado antes, ésta, además de ser una actividad neurálgica de la etapa de operación de los autobuses eléctricos, también representa una ventaja en términos de costos frente a los vehículos de combustión interna (Hanlin et al., 2018).

3. Llantas. En ciertos casos, se ha reportado un aumento en el desgaste derivado del peso del vehículo que puede impactar ligeramente en el aumento de costo de este concepto (Hanlin et al., 2018).
4. Seguros: Este concepto suele representar uno de los costos con mayor aumento relativo frente a los buses convencionales, debido a que las primas de seguros guardan una relación directa con el costo del vehículo. Aun cuando este concepto no representa una gran proporción de los costos totales es importante tener en cuenta su posible variación.
5. Otros: Los sistemas de transporte incurren en diversos costos adicionales tales como los costos administrativos, limpieza de vehículos e infraestructura, capacitaciones, seguridad, entre otros.
6. Mantenimiento de infraestructura de recarga: a diferencia de los modelos tradicionales, en la operación de vehículos eléctricos se debe contemplar también los costos de mantenimiento de la infraestructura de recarga, incluyendo los cargadores.

c. Costo de reemplazo

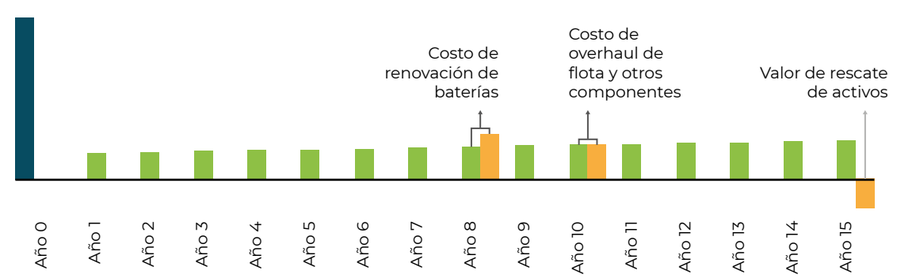
El costo de reemplazo de componentes mayores es un concepto relevante en el análisis del TCO de los autobuses eléctricos.

1. Reemplazo de baterías del vehículo eléctrico: La importancia de los costos de reemplazo en los autobuses eléctricos, especialmente en los BEB, se debe principalmente a que diferentes modelos de implementación han optado por definir una vida útil de la batería en un plazo menor al del vehículo (en muchos casos entre 7 y 8 años, que representa el 50% de la expectativa de vida útil para estos vehículos) (Linscott Meredith, 2021). Esto significa que las flotas tendrán que reemplazar por lo menos una vez sus baterías durante el ciclo de vida de los autobuses.
2. Algunas experiencias recientes han definido la vida útil de la batería de los vehículos en 12 años y estudiado procedimientos de reacondicionamiento de las mismas para extender su vida útil (Johnson et al., 2020).
3. Otros de reacondicionamiento de los vehículos (Overhaul): Un componente adicional del costo de ciclo de vida de los vehículos es el costo de reacondicionamiento de los vehículos, mismo que les permite cumplir el total de la expectativa de vida útil. Este componente representa una de las incertidumbres principales expresadas por los operadores para todos los modelos de vehículos. Esto es debido a que el reacondicionamiento general de un vehículo significa una inversión importante de capital que sólo se justifica si la vida útil restante o adicional del vehículo brinda tiempo suficiente para amortizar esta inversión y los costos de operación siguen haciendo financieramente viable mantener el vehículo. En el caso de los vehículos eléctricos la experiencia temprana apunta a que los costos de overhaul serán significativamente menores debido a la ausencia de los componentes del tren motriz que representa los mayores costos y esfuerzos de reemplazo: motor de combustión interna, transmisión y sistemas complementarios de motor.

d. Diferencias encontradas en el CTP de los autobuses eléctricos y otras tecnologías.

El comportamiento típico de los modelos de CTP de los sistemas de transporte eléctrico suelen presentarse de acuerdo con lo que se muestra en la Figura 26.

Figura 26 Comportamiento típico de diferentes conceptos del CTP de flotas de autobuses eléctricos



Fuente: Autores

Los estudios y proyectos de implementación de flotas de autobuses eléctricos han permitido obtener algunas conclusiones sobre el CTP, mismas que pueden ayudar a formular modelos de implementación con mayores ventajas financieras.

- Los BEB son más rentables en la medida en que su utilización aumenta. Las ventajas de los BEB frente a sus semejantes de combustión interna están en los menores costos de operación. Por ello, en términos financieros los sistemas de transporte eléctricos tenderán a mejorar resultados financieros en la medida en que aumenta la utilización de la flota (kilometraje medio diario, kilometraje anual de la flota, etc.…).

Esto será posible en tanto se optimizan la estrategia de recarga y la programación de la flota permitiendo a los vehículos recorrer más kilómetros diariamente.

- Garantizar los menores precios por el consumo de energía. Dentro de los costos de operación, la mayor oportunidad que tienen los BEB está en su eficiencia energética. En consecuencia, los esfuerzos de las autoridades deben orientarse a conseguir la mejor tarifa por la compra de la energía al mismo tiempo que una gestión proactiva y temprana del proyecto frente a las empresas de energía. Esto incluye también la gestión para que la operación de sistemas de transporte público esté exenta de contribuciones en la energía.
- Las incertidumbres de largo plazo que se presentan en el CTP deben ser atendidas en los contratos de adjudicación o adquisición de los componentes del sistema. En particular es importante contemplar previsiones y garantías contractuales sobre los conceptos de servicio postventa, mantenimiento, provisión de partes y refacciones y gestión y descarte de baterías, que permitan mitigar los riesgos de los costos a largo plazo.

En general, los análisis financieros realizados apuntan a la paridad de CTP entre una flota de BEB y los de combustión interna comparables (estándares más altos). Si bien esto puede ser posible bajo ciertas condiciones de operación, costos y subsidios a las diferentes tecnologías y combustibles, y estructuración financiera de los sistemas, no debe ser asumido como una premisa universal. En algunos casos los análisis financieros indican que las diferencias entre las flotas de BEB y de combustión son marginales en favor de alguna de las dos flotas o inclusive a favor de las flotas tradicionales.

Es importante mencionar que, aunque el CTP es un instrumento útil para el análisis de proyectos, no es el único ni es conclusivo sobre la viabilidad del proyecto. Por ejemplo, la reducción del CTP de un Sistema de Transporte incorporando vehículos eléctricos no significa que existan los recursos para lograr cubrir los costos de capital en la fase inicial del proyecto. Por otro lado, como se ha mencionado anteriormente, algunas reducciones de costos de los sistemas de transporte eléctrico son posibles en la medida en que se alcanzan ciertas economías de escala, mismas que nunca se lograrían sin un proyecto inicial.

La recomendación ante esta situación es que las ciudades e instituciones promotoras de proyectos de autobuses eléctricos realicen estudios detallados para la implementación de sus primeras flotas eléctricas considerando los planes, ahorros y otros beneficios sociales y ambientales de largo plazo de estas tecnologías. Así mismo, que los resultados obtenidos sean valorados dentro de un conjunto de criterios de decisión que ponderen los diferentes aspectos que puedan apoyar a la toma de decisión. Finalmente,

es importante que la planeación incorpore medidas de gestión de riesgos financieros que permitan mejorar los resultados financieros del proyecto y generar ahorros económicos y financieros mediante el proyecto en el corto, mediano y largo plazo.

09

Financiamiento y modelos de negocio.

El modelo de negocios y la estructura de financiamiento de los sistemas de transporte público están altamente relacionados, dado que el primero puede ser el resultado de las necesidades identificadas en el segundo y la definición de ambos aspectos repercute en la sostenibilidad de los proyectos en el tiempo, tanto por aspectos técnicos como financieros.

Las ciudades en América Latina y en general en países en desarrollo están atrapadas en un círculo vicioso que se deriva de la falta de recursos para invertir y sostener los sistemas de transporte público, que no les permite ofrecer la calidad deseada a los usuarios y por lo tanto estos dejan de usar el servicio, lo que reduce aún más los ingresos para pagar costos de inversión, de operación y mantenimiento (Ardila-Gomez & Ortegon-Sanchez, 2016). Esta espiral negativa también ha llevado a que se deban enfrentar problemas de bancabilidad de los proyectos pues se han incumplido compromisos financieros y no se perciben proyectos sólidos desde el punto de vista de la inversión de recursos.

La incorporación de buses eléctricos en este contexto resulta ser un desafío mayor pues la necesidad de recursos de inversión crece, pero también es una oportunidad, dado que la operación y el mantenimiento de los vehículos cuesta menos, es más confiable y genera mayores beneficios sociales. económicos y ambientales, tal como se explica en el Capítulo 8. En cualquier caso, sin importar la tecnología, se debe lograr una estructura de financiación y del negocio que propenda por contar con los recursos necesarios durante toda la vida del proyecto para pagar las inversiones y lograr la continuidad en la prestación del servicio con la calidad deseada, que depende de estar en capacidad de poder pagar los costos de operación y mantenimiento y, además, contar con las herramientas necesarias para cumplir de manera adecuada con las tareas encargadas.

También, es importante resaltar que, a pesar del círculo vicioso explicado, la Región es líder en la incorporación de flotas y del desarrollo de mecanismos que permitan avanzar hacia la descarbonización del transporte por delante de Europa y Estados Unidos.

A. Opciones de financiamiento

En este apartado se discutirá cuáles son las opciones para conseguir los recursos que se requieren y así hacerles frente a los costos de un proyecto de transporte público. Para esto, se usarán los siguientes dos conceptos, que suponen distintos retos para las ciudades:

1. Fondeo: se refiere a las fuentes de ingresos con las que cuentan las ciudades para cubrir los costos de implementación (inversión, operación y mantenimiento) de un proyecto de transporte público
2. Financiamiento: corresponde a los recursos financieros que forman parte de la estructura de capital utilizada para el desarrollo del proyecto, dentro de los cuales pueden estar recursos públicos, privados (equity) y recursos de deuda.

La principal fuente de fondeo de los sistemas de transporte público en América Latina es lo que se recauda de las tarifas a los usuarios, sin embargo, no es suficiente para cubrir los costos descritos en el Capítulo 8 y la "autosostenibilidad" de los sistemas no es un objetivo viable. La participación del recaudo de tarifas en los costos del sistema de transporte público depende de cómo se agrupen los costos recurrentes, dado que en algunos casos las inversiones iniciales en infraestructura (estaciones, paraderos, vías exclusivas, terminales, patios, tecnología, entre otros) se pagan con aportes nacionales y locales, y no se espera que se cubran con las tarifas de los usuarios. También, depende del modelo de negocio que se esté usando, pues en el caso más tradicional en el que las empresas privadas tienen a cargo la prestación del servicio en su totalidad, el recaudo de tarifas es la única fuente de ingresos para el sistema.

En el caso de los sistemas integrados de transporte público de Bogotá y Santiago de Chile, en los que la prestación del servicio está concesionada a empresas privadas, el recaudo de tarifas tiene una participación que puede estar entre el 50-75% en la situación pre-COVID. En ciudades similares en Europa, este porcentaje varía entre el 30 y el 60% de los costos de los sistemas (Porcel & Gordillo, 2018) y los subsidios o contribuciones públicas cubren el resto. En otras ciudades donde no existe la fuente permanente de subsidios del gobierno, los sistemas presentan baja calidad y, cuando se materializan riesgos como el asociado al COVID-19, se enfrentan a eventos de parálisis del transporte pues no se cuenta con los recursos suficientes para continuar prestando el servicio por la baja demanda de pasajeros.

El escenario ideal, tal como lo han expresado varios autores en los últimos años (Ardila-Gomez & Ortegon-Sanchez, 2016; Gómez Marcela Andrea, Rodriguez Jesús, Manuel, Hidalgo Dario, 2018; Porcel & Gordillo, 2018) es necesario construir un sistema de fuentes de pago que sea suficiente para cubrir los costos de un sistema de transporte público que responda a las necesidades de la ciudad con calidad, eficiencia y responsabilidad social y ambiental. Para esto, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. El sistema de transporte de la ciudad debe buscar fuentes de ingresos propios que propendan por incrementar y mantener la buena calidad del componente de transporte más eficiente y accesible, es decir, del colectivo y del masivo. Dentro de estas fuentes pueden estar los ingresos colaterales del sistema de transporte público colectivo (publicidad, arrendamiento de espacios comerciales, desarrollos urbanos alrededor del sistema, consultoría, entre otros), así como los proyectos de tarificación al transporte privado cuyos ingresos puedan tener destinación específica al transporte público (cobros por congestión o contaminación, estacionamiento en vía y fuera de vía, impuestos por tenencia o uso de vehículos privados, impuestos a los combustibles, entre otros).
2. Dado que el transporte público es un servicio esencial para las ciudades pues no se puede acceder a las demás actividades si no se cuenta con una oferta adecuada del mismo, los gobiernos nacionales y subnacionales deben buscar en conjunto mecanismos para subsidiar el sistema de transporte público propendiendo por el costo-eficiencia y el costo-efectividad en los proyectos. Estos subsidios provienen del presupuesto general del Estado y por lo tanto su fuente son los impuestos. En algunos casos, si los recursos no son suficientes, el presupuesto asignado al sistema de transporte público limita lo que se puede invertir en otros sectores como por ejemplo salud y educación, por lo cual es muy importante conseguir fuentes alternativas de recursos y buscar la eficiencia en la prestación del servicio sin sacrificar la calidad.
3. Por otro lado, la política de tarifas al usuario debe estar acorde con la capacidad de pago de los ciudadanos, las características socioeconómicas de la ciudad, las políticas nacionales y locales de subsidios a la población, y a la calidad misma de la oferta del transporte. Asimismo, esta política debe estar alineada con los esfuerzos que se hagan en los dos puntos anteriores pues no es factible ofrecer un sistema de transporte público con calidad a tarifas adecuadas sin recursos de fuentes distintas.
4. También, en el caso particular de proyectos de transporte público con flota eléctrica, se puede acceder a recursos no reembolsables de organizaciones multilaterales cuyo objetivo esté alineado con la mitigación del cambio climático y en general con la reducción de los impactos que tiene el transporte en el ambiente y la sociedad. Aquí se puede mencionar el Fondo Verde del Clima (GCF por sus siglas en inglés), que es el mecanismo de financiamiento de la Convención Marco de las Naciones

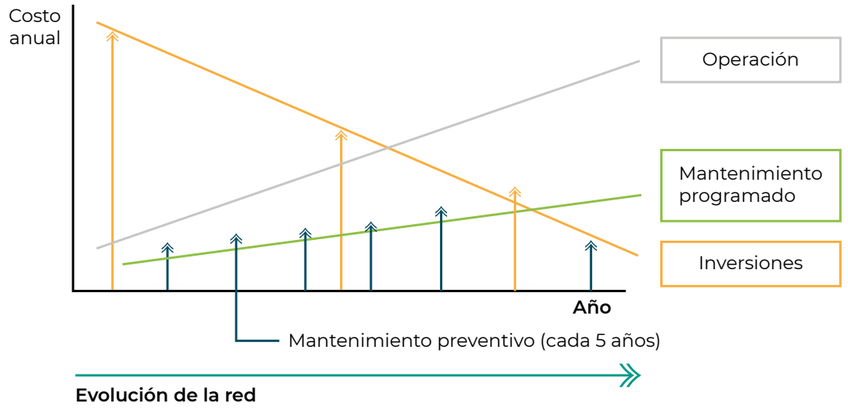
Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y frente al cual varios países de América Latina tienen Autoridades Nacionales Designadas para gestionar recursos.

5. Por último, es importante establecer mecanismos para controlar y reducir la evasión al pago de las tarifas de acceso al sistema de transporte público. Esto debido a que los niveles de evasión en ciudades de la región pueden superar el 10% del total de validaciones en el sistema, aumentando la presión por subir las tarifas a los usuarios que pagan o sobre los subsidios del Estado.

La suficiencia de estas fuentes en el tiempo repercute en la sostenibilidad financiera del proyecto. Sin este balance, los proyectos pueden llegar a sufrir reveses que van desde el desmejoramiento de la calidad, el incumplimiento de compromisos contractuales y hasta el cese total de actividades, con consecuencias nefastas para el desarrollo urbano y de la población.

Una vez se encuentren y se formalicen las fuentes de recursos para el fondeo del sistema, con base en la estructuración financiera de los proyectos se debe determinar cómo es el flujo de recursos para su implementación, que generalmente tiene un comportamiento como se muestra en la Figura 27 (Ardila-Gomez & Ortegon-Sanchez, 2016).

Figura 27 Comportamiento típico del flujo de recursos que requieren los proyectos de transporte



Fuente: Ardila-Gomez & Ortegon-Sanchez, 2016

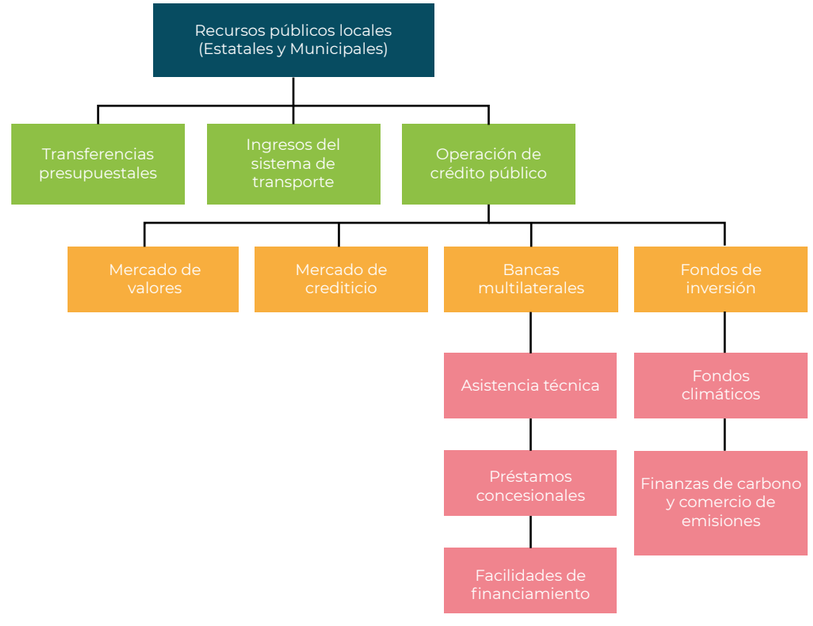
Tal como se puede observar, al inicio del proyecto se requiere un desembolso importante de recursos que lleva a que el Estado busque diferentes opciones de financiamiento

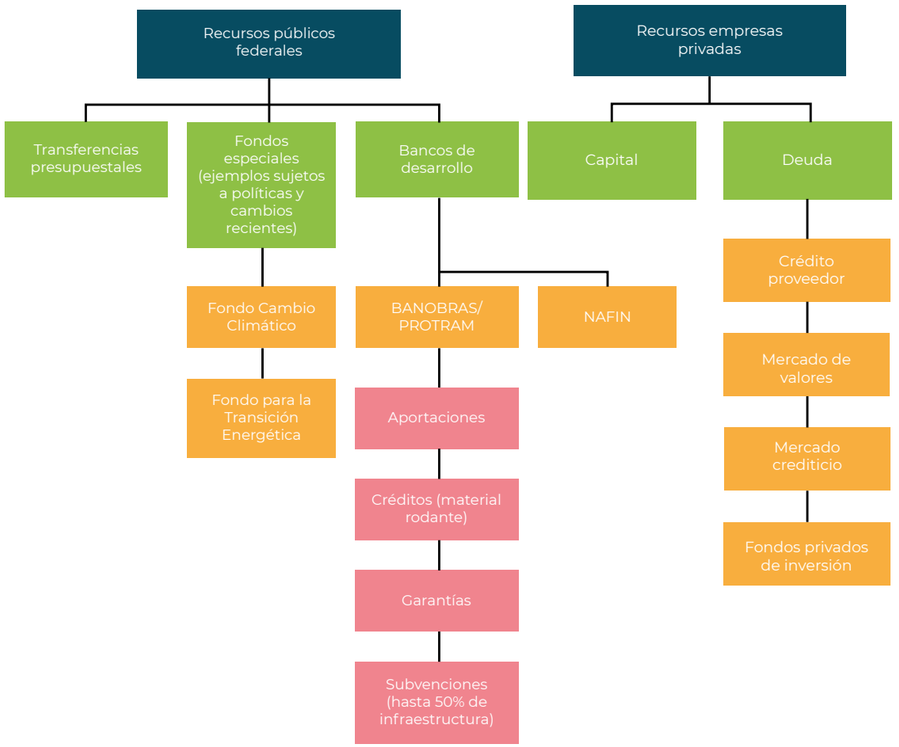
que permitan tener el flujo de caja necesario. En el caso de los buses eléctricos se debe resolver como mínimo el financiamiento de la flota, del terreno del patio, de la construcción del patio, y de las estaciones y terminales, así como de la construcción de vías exclusivas y paraderos cuando aplique. En la mayoría de los casos, para el pago de costos de operación y mantenimiento no se requiere acceder a deuda, sino que se usan los fondos recurrentes que sostienen el proyecto y que cubren también el servicio de la deuda.

En cuanto a las opciones de financiamiento, las Asociaciones Público-Privadas han sido una solución para el financiamiento de los sistemas de transporte público en la región pues las empresas privadas se especializan en la consecución de recursos para proyectos de transporte y en contraprestación reciben pagos constantes y estables de parte de una entidad pública. En el modelo más tradicional de la prestación del servicio de transporte público y que aún está presente en muchos lugares de la región, las empresas privadas reciben las tarifas directamente de los usuarios, asumiendo la totalidad del riesgo de demanda de los sistemas y con unas implicaciones importantes en la calidad del servicio.

En resumen, las opciones de financiamiento en el caso específico de las ciudades mexicanas son los siguientes.

Figura 28 Fuentes de financiación típicas en proyectos de transporte, incluyendo las específicas del contexto mexicano





Fuente: Autores con base en PNUMA, 2020

Cabe anotar que los requisitos para acceder a estos financiamientos pueden variar de acuerdo con la entidad financiera, pero en general los aspectos que se revisan son los siguientes:

1. Cupo de endeudamiento aprobado a la entidad contratante: esto aplica en el caso de que las entidades públicas decidan endeudarse directamente
2. Calificación de riesgo a la empresa contratante
3. Estructuración técnica, financiera y legal del proyecto: proyecciones de demanda de usuarios, de ingresos por tarifas al usuario, de otros ingresos (subsidios del gobierno u otros), condiciones contractuales, matriz de riesgos, garantías ofrecidas a los inversionistas, entre otros
4. Evaluación socioeconómica (estimación de impactos ambientales y sociales del proyecto) y análisis costo/beneficio (ACB).

5. Sostenibilidad financiera del proyecto: esto se deriva de la estructuración del proyecto y refleja si existirán en el tiempo los recursos necesarios para pagar los compromisos asumidos desde e
6. Riesgo de no pago a las entidades financieras
7. Presupuesto aprobado a la entidad contratante en el tiempo del contrato
8. Innovación en los modelos de negocio
9. Perspectiva de género en el proyecto
10. Viabilidad política y de implementación del proyecto, es decir que haya voluntad política, existan los recursos para pagar los costos y esté dispuesta la estructura institucional necesaria
11. Antecedentes y análisis de contexto del transporte público en la ciudad, qué tipos de desafíos han enfrentado, qué empresas hacen parte del mercado de operadoras, entre otros aspectos que pueden llegar a afectar la bancabilidad y atractividad del proyecto

B. Modelos de negocio de referencia

Un modelo de negocios se refiere principalmente a cómo se distribuyen las responsabilidades y los riesgos en la prestación del servicio de transporte público, generando incentivos, desincentivos y sinergias entre los actores. Su viabilidad e implementación dependen de los mecanismos de contratación y el ámbito legal de cada país, sin embargo, este capítulo está enfocado en la estructura del negocio mas no en el vínculo legal entre los actores, pues un mismo modelo de negocios puede ser implementado usando diferentes instrumentos legales.

En el caso de la prestación del servicio de transporte público urbano en buses, las principales funciones o responsabilidades que se deben asignar al construir el modelo de negocios de un sistema de transporte público en particular, son las siguientes:

1. Planeación estratégica del sistema (técnica y financiera)
2. Supervisión de la prestación del servicio
3. Planeación táctica del sistema (programación)
4. Control de la operación
5. Financiamiento y adquisición de la flota
6. Operación y mantenimiento de la flota
7. Financiamiento y adquisición del terreno del patio
8. Financiamiento y construcción del patio
9. Operación y mantenimiento del patio
10. Financiamiento y construcción de estaciones, paraderos y terminales
11. Operación y mantenimiento de estaciones y terminales

La asignación de estas responsabilidades debe tener en cuenta qué actor tiene los incentivos adecuados y las capacidades necesarias para asumir determinadas tareas y cumplir con el principal objetivo de la prestación de un servicio público que es suplir las necesidades de los usuarios con calidad, eficiencia, accesibilidad y bajo impacto ambiental. En este sentido, el primer paso en el árbol de decisiones que se genera al momento de distribuir responsabilidades es qué se asigna al sector público y qué se puede delegar en el sector privado.

Las decisiones con respecto a la planeación, supervisión y control del sistema de transporte público generalmente son encabezadas por las empresas o entidades públicas encargadas de garantizar la prestación del servicio con calidad, la integración y coordinación con otros modos de transporte presentes en la ciudad y la sostenibilidad financiera del sistema. De esta manera, no se generan incentivos perversos para que se reduzca la calidad que se presta a los usuarios en busca de eficiencias económicas. Esto, sin embargo, no ocurre en todos los modelos de negocios presentes en América Latina.

Por otro lado, en este capítulo no se profundiza en lo relacionado con el medio de pago y el recaudo de las tarifas en los sistemas de transporte público. Sin embargo, es importante contar con un sistema de recaudo interoperable en la ciudad para que los buses nuevos que se incorporen a un sistema existente se puedan integrar con los otros modos de transporte o vehículos ya operando y los usuarios puedan usar el mismo medio de pago para su uso (Porcel & Gordillo, 2018).

Los actores que podrían ser parte de un modelo de negocio se pueden agrupar de la siguiente manera:

Figura 29 Lista de actores que pueden hacer parte de un modelo de negocio

Sector público	Sector privado
Autoridad de tránsito y transporte.	**Proveedor de flota (Fondos de capital privado, Operadores de transporte, Proveedores-distribuidores de energía, Fabricantes de buses):** empresas privadas con la capacidad financiera y de gestión para conseguir los recursos necesarios para comprar la flota o el terreno del patio o construir la infraestructura de soporte.
Ente gestor: es la entidad pública encargada de la administración y gestión del sistema de rtransporte público o de una parte de él.	**Operador de flota (Operadores de transporte):** empresas privadas con experiencia en la operación y mantenimiento de buses a nivel local o regional.
Operador público: es la entidad pública que opera dorectamente la flota de transporte y en algunos casos también ejerce como Ente gestor.	**Proveedor-distribuidor de energíua:** empresa encargada de proveer o distribuir la energía a nivel local, puede ser de carácter privado o mixto. Por su experiencia en el sector energético, puede ser un buen aliado en la construcción de infraestructura de soporte para los buses, en la operación con la provisión de la energía y en algunos casos también en el negocio financiero de los costos de inversión.
Entidad de infraestructura de la ciudad: entidad encargada de administrar y construir los bienes de infraestructura pública de la ciudad.	

Fuente: Autores con base en investigación de casos descritos en el Anexo

Los modelos de negocio que se encuentran presentes en América Latina y en otras ciudades referentes en transporte público en el mundo, se pueden resumir de la siguiente manera, anotando en cada función cuáles son los responsables opcionales en cada tipo de modelo. No se define un solo actor por función pues cada modelo puede tener variaciones de acuerdo con el contexto local.



Como se puede ver en la Tabla 4, en cada modelo de negocio las funciones se distribuyen entre posibles actores público y privados, construyendo con cada decisión una estructura institucional que tiene ventajas y desventajas. No se puede decir que existe un único modelo de negocio válido o adecuado pues cada contexto es distinto y cada ciudad debe encontrar la fórmula que mejor funcione de acuerdo con sus prioridades, lecciones aprendidas y necesidades. Sin embargo, el modelo de negocio tradicional presenta varias deficiencias en la calidad del servicio al usuario que lo ponen generalmente en la posición de mayor desventaja frente a las demás opciones.

Punto de recarga de autobuses eléctricos bajo el modelo de operación, provisión de flota y provisión de patios separados
Fuente: Infobae.com

Tabla 4 Modelos de negocio presentes en América Latina y la distribución asociada de responsabilidades

Función	Modelos de negocio					
	Tradicional	Integral APP	Separado 1 APP	Separado 2 APP	Operador público 1	Operador público 2
Planeación estratégica del sistema (técnica y financiera)	Autoridad de tránsito y transporte	Autoridad de tránsito y transporte y Ente gestor	Autoridad de tránsito y transporte y Ente gestor	Autoridad de tránsito y transporte y Ente gestor	Autoridad de tránsito y transporte y Ente gestor u Operador Público	Autoridad de tránsito y transporte y Ente gestor u Operador Público
Supervisión de la prestación del servicio	Autoridad de tránsito y transporte	Ente gestor	Ente gestor	Ente gestor	Ente gestor u Operador Público	Ente gestor u Operador Público
Planeación táctica del sistema (programación)	Operador de flota	Ente gestor u Operador de flota	Ente gestor	Ente gestor	Ente gestor u Operador Público	Ente gestor u Operador Público
Control de la operación	Operador de flota	Ente gestor u Operador de flota	Ente gestor	Ente gestor	Ente gestor u Operador Público	Ente gestor u Operador Público
Financiamiento y adquisición de la flota	Operador de flota	Operador de flota	Proveedor de flota	Proveedor de flota o Proveedor-distribuidor de energía	Operador público o Gobierno Local	Proveedor de flota
Operación y mantenimiento de la flota	Operador de flota	Operador de flota	Operador de flota	Operador de flota	Operador público	Operador público
Financiamiento y adquisición del terreno del patio	Operador de flota	Ente gestor u Otra entidad pública u Operador de flota	Ente gestor u Otra entidad pública u Operador de flota o Proveedor de flota	Ente gestor u Operador de flota o Proveedor de flota o Proveedor-distribuidor de energía	Operador público	Operador público o Proveedor de flota
Financiamiento y construcción del patio	Operador de flota	Ente gestor u Otra entidad pública u Operador de flota	Operador de flota o Proveedor de flota	Operador de flota o Proveedor de flota o Proveedor-distribuidor de energía	Operador público	Operador público o Proveedor de flota

Función	Modelos de negocio					
	Tradicional	Integral APP	Separado 1 APP	Separado 2 APP	Operador público 1	Operador público 2
Operación y mantenimiento del patio	Operador de flota	Operador de flota	Operador de flota	Operador de flota	Operador público	Operador público
Financiamiento y construcción de estaciones, paraderos y terminales	N/A	Ente gestor u Operador de flota	Ente gestor	Ente gestor	Ente gestor u Operador Público	Ente gestor u Operador Público
Operación y mantenimiento de estaciones y terminales	N/A	Ente gestor u Operador de flota	Ente gestor	Ente gestor	Ente gestor u Operador Público	Ente gestor u Operador Público

Fuente: Autores con base en investigación de casos descritos en el Anexo

Algunas características de los modelos presentados son las siguientes:

1. Tradicional: en este modelo la delegación de funciones al sector privado se hace a través de la asignación de permisos de operación a muchas empresas que se caracterizan por ser pequeñas, familiares, poco profesionalizadas y reguladas. Dado que se hace una delegación casi total de funciones en estos actores privados, el Estado tiene poco control sobre la calidad del servicio que se presta y se generan unos fenómenos de competencia por el mercado en la vía, debido a que el único ingreso de las empresas depende de la cantidad de pasajeros que se recojan al día (la llamada “Guerra del centavo”), que ponen en riesgo la seguridad de los usuarios. También, como la única fuente de ingresos para pagar los costos y gastos del sistema es el recaudo de tarifas, no se cuenta con los recursos e incentivos para renovar y mejorar la calidad de los servicios. Por otra parte, la calidad y capacidad de las empresas no facilita la consecución de financiación para hacer inversiones en la mejora del servicio (Díaz et al., 2015)que no cuentan con canales de financiamiento ade-cuado para hacer las inversiones que los nuevos sistemas de transporte requieren. Esto se debe en gran medida a la falta de capital para la constitución de las empresas, a la carencia de garantías satisfactorias, a la inexistencia de estructuras organizacionales y gobiernos corporativos adecuados, a la falta de un historial financiero detrás y al alto riesgo que los términos de los contratos suponen para el operador. Los riesgos no son sólo internos: también hay situaciones externas a

las empresas que hacen peligrar su modelo de negocio: carencia de infraestructura adecuada, implementación incompleta de sistemas de control y recaudo, disminución de la demanda, aumento de la congestión vehicular, etc. El presente estudio es parte de un esfuerzo conjunto del Banco Interamericano de Desarrollo y el Centro de Transporte Sustentable CTS EMBARQ México. En él se identifican y analizan las necesidades y mecanismos de financiamiento de operado-res privados de transporte público de superficie en tres ciudades de Latinoamérica: Bogotá, Ciudad de México y Santiago de Chile. Tomando como casos de estudio a tres empresas, se hace una evaluación de los riesgos financieros existentes en la actualidad, estableciendo las condiciones técnicas, económicas, comerciales, organizacionales y políticas necesarias para la generación de oportunidades de financiamiento desde la banca de desarrollo. Estas condiciones se basan en la adopción de esquemas de riesgo compartido entre Estado y operadores, en el establecimiento de gobiernos corporativos sólidos y técnicamente asesorados, en la definición de reglas claras y transparentes de operación, en el establecimiento de políticas tarifarias rigurosas y confiables en el largo plazo y en el reforzamiento de mecanismos de regulación y seguimiento financiero y operativo de las empresas.”,”author”:[{“dropping-particle”:””,”family”:”Díaz”,”given”:”Rodrigo”,”non-dropping-particle”:””,”parse-names”:-false,”suffix”:””},{“dropping-particle”:””,”family”:”Lugo”,”given”:”Rigoberto”,”non-dropping-particle”:””,”parse-names”:false,”suffix”:””},{“dropping-particle”:””,”family”:”Páez”,”given”:”Fernando”,”non-dropping-particle”:””,”parse-names”:false,”suffix”:””},{“-dropping-particle”:””,”family”:”Mojica”,”given”:”Carlos”,”non-dropping-particle”:””,”parse-names”:false,”suffix”:””},{“dropping-particle”:””,”family”:”Corbacho”,”given”:”Iván”,”-non-dropping-particle”:””,”parse-names”:false,”suffix”:””}],”container-title”:”Banco Interamericano de Desarrollo”,”id”:”ITEM-1”,”issued”:{“date-parts”:[[“2015”]]},”page”:”1-48”,”title”:”Oportunidades de financiamiento a operadores privados de transporte público en Latinoamérica 3 casos de estudio: Bogotá, Ciudad de México y Santiago”,”type”:”article-journal”,”volume”:”VII”},”uris”:[“http://www.mendeley.com/documents/?uuid=58bdb491-9a94-4289-8a0d-6795b5231b00”]}],”-mendeley”:{“formattedCitation”:”(Díaz et al., 2015.

2. Integral APP: se refiere al primer modelo de negocio de Asociación Público-Privada que se implementó para superar los retos que se derivaron del modelo tradicional. En este se vincula una empresa privada que asume las tareas de provisión y operación de la flota, así como la construcción y mantenimiento de la infraestructura del patio. En el caso de Rio de Janeiro, que a esta empresa también se le delegan funciones de mantenimiento de infraestructura de estaciones y terminales, así como del sistema de control, recaudo e información centralizado. En la mayoría de los casos, estas empresas se conformaron con las pequeñas empresas y propietarios del

modelo tradicional, lo que generó una continuidad en la dependencia de los mismos actores y unos problemas de calidad derivados de la baja profesionalización de las empresas y su poca capacidad organizacional y financiera.

3. Separado APP: este modelo de negocio surge de la necesidad de estructurar proyectos de transporte bancables, con una mejor asignación de riesgos y responsabilidades y que abrieran la puerta a otros actores más especializados y diversos en la prestación de ciertos servicios. En una primera generación de este modelo, la separación se dio principalmente entre la provisión y operación de la flota, atrayendo a actores especializados en conseguir recursos como es el caso de los fondos privados de inversión y otras compañías con fuertes músculos financieros (los mismos fabricantes de flota). En una segunda generación y como resultado de la evolución de los proyectos de movilidad eléctrica, otro tipo de actor entró a la arena y es el sector energético, que además de ser experto en la tecnología eléctrica, generalmente se caracteriza por tener alta capacidad financiera.
4. Operador público: se refiere al tipo de modelo en el cual se cuenta con una empresa pública que asume directamente la operación del sistema de transporte. La variación entre el Modelo 1 y el 2 es la provisión de la flota y del patio, actividades en las cuales puede participar una empresa privada para complementar el modelo puro de operación pública. La incorporación de una empresa privada para proveer flota e infraestructura se puede derivar de una necesidad financiera de conseguir recursos en el sector privado.

Ahora, algunos elementos cruciales para tener en cuenta para tomar la decisión del modelo de negocio que mejor se ajusta a las necesidades de cada ciudad se presentan en la siguiente comparación.

Tabla 5 Comparación de modelos de negocio tipo

Criterio	Tradicional	Integral APP	Separado APP	Operador público
Bancabilidad	Las empresas que participan de este modelo tienen muy bajo acceso al mercado crediticio o de valores (BID, 2015).	La experiencia en varias ciudades de América Latina ha llevado a que este tipo de modelos no sea bancable pues se han incumplido compromisos financieros en un escenario de recursos limitados pues se le dio prioridad al pago de costos de operación.	Para la banca comercial, los bancos de desarrollo, las bancas multilaterales y los fondos de inversión, el modelo separado es el que mejor asigna riesgos y responsabilidades. Además, permite reducir el riesgo de que no se repaguen las deudas pues los recursos no se pueden desviar para pagar solo costos de operación en un escenario de recursos limitados.	Depende de la calificación de riesgo de la entidad contratante del crédito.

Criterio	Tradicional	Integral APP	Separado APP	Operador público
Flexibilidad y continuidad en la prestación del servicio	La continuidad en la prestación del servicio se puede ver amenazada constantemente por cambios en la demanda de usuarios, que ponen en riesgo la estabilidad financiera del negocio.	No es flexible dado que todos los servicios están atados al mismo actor y hacer cambios tiene implicaciones más difíciles de administrar. La continuidad en la prestación de servicio se puede perder en el caso de presentarse mal desempeño de las empresas o dificultades financieras, dado que también se perdería la disponibilidad de la flota.	Es el más flexible en la medida en que no existe dependencia de un solo actor en la prestación del servicio. Adicionalmente, permite contar con varios contratos de operación en el término de un solo contrato de provisión. Facilita la continuidad en la prestación de servicio, pues en caso de eventos especiales el servicio no depende de un solo actor. Este criterio mejora en la medida en que no se tenga un único lote de flota.	En el caso en que la provisión de la flota no está atada al operador público, se logra mayor flexibilidad pues si los resultados del operador no son satisfactorios, se puede con mayor facilidad migrar hacia otro modelo.
Especialización y calidad del servicio	Las empresas cuentan con la experiencia de operar durante muchos años los sistemas de transporte en las ciudades, pero no cuentan con fortalezas organizacionales y financieras.	Las empresas, de origen en el modelo tradicional, cuentan con la experiencia técnica requerida para la operación y el mantenimiento de la flota, pero no con las capacidades financieras necesarias.	Permite y propende por la participación de actores mucho más especializados en las tareas requeridas para la prestación del servicio. Esto también repercute en la calidad de los servicios prestados.	Depende de si se separan o no las responsabilidades. También, se debe tener en cuenta que las empresas privadas son las más especializadas en la operación y el mantenimiento de buses, por su experiencia en el modelo tradicional.
Concentración del mercado	El mercado está bastante atomizado en pequeñas empresas y propietarios.	Al requerirse capacidad organizacional y financiera para ser parte de este modelo, las empresas que pudieron organizarse para participar son pocas y en ellas se concentra el mercado.	Dado que no se exige capacidad técnica y financiera, más empresas pueden participar y la concentración del mercado es menor. Aunque la experiencia en las ciudades donde ya se ha implementado este modelo muestra que los operadores de transporte tradicionales siguen teniendo una presencia muy fuerte en el negocio, cada vez hay más actores de diversos sectores participando.	Contar con un operador público reduce la dependencia de las ciudades de las empresas operadoras privadas tradicionales.
Capacidad institucional requerida	Se requiere muy baja capacidad institucional dado que no hay contratos de por medio.	Se requiere fuerte media capacidad institucional para administrar y supervisar contratos y actores encargados de proveer los servicios de transporte.	Se requiere alta capacidad institucional para administrar y supervisar un mayor número de contratos y actores encargados de proveer los servicios de transporte. La carga administrativa de los organismos gestores tiende a aumentar.	Se requiere alta capacidad institucional de tipo técnica y financiera para prestar servicios de transporte directamente.

Fuente: Autores con base en investigación de casos descritos en el Anexo

10

Proceso de implementación (adquisiciones y contratos necesarios)

A. Adquisición o contratación e implementación de la flota de buses eléctricos, baterías e infraestructura de carga

El proceso de adquisición e implementación de los elementos necesarios para un sistema de transporte público de buses eléctricos depende del modelo de negocios elegido, anteriormente explicado, y del mecanismo de delegación. En general, los mecanismos de delegación que se pueden usar se presentan en el Cuadro 6.

Cuadro 6 Clasificación general de mecanismos de

Para provisión de bienes (autobuses, baterías, equipos de recarga, infraestructura)	Para prestación de servicios (operación y mantenimiento de autobuses, mantenimiento de equipos y mantenimiento de infraestructura)
1. Contrato de compra 2. Contrato de concesión o de obra 3. Contratos directos con otras entidades públicas 4. Contrato de arriendo	5. Permisos de operación 6. Contrato de concesión o de prestación de servicios 7. Contratos directos con otras entidades públicas 8. Contrato de arriendo

Fuente: Autores con base en investigación de casos descritos en el Anexo

Dentro de los criterios que se consideran comúnmente para decidir qué mecanismos legales de delegación se escogen para el proyecto, se encuentran los siguientes:

1. Tiempos de ejecución derivados de los plazos legales y de las gestiones requeridas ante otras entidades
2. Disponibilidad de recursos y mecanismos de financiación disponibles
3. Distribución de riesgos deseada
4. Costos asociados a cada mecanismo (incluidos administrativos)
5. Nivel de control y supervisión que permite cada mecanismo
6. Propiedad de los activos que se adquieren
7. Capacidades técnicas disponibles en otras entidades públicas

En todos los casos, a excepción de los permisos de operación, los siguientes elementos son componentes fundamentales de los documentos que reglamenten el arreglo entre las partes:

1. Alcance técnico detallado
2. Indicadores de desempeño y metodología de cálculo y evaluación
3. Esquema de remuneración y de descuentos
4. Asignación de riesgos y mecanismos de mitigación
5. Fórmulas de salida
6. Esquema de multas
7. Esquema de pólizas

También, en el caso que haya un proceso de licitación previo a la firma de contratos, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos en la etapa de concurso:

1. Requisitos habilitantes legales
2. Requisitos habilitantes técnicos
3. Requisitos habilitantes financieros
4. Mecanismo de evaluación de propuestas
5. Garantías de la propuesta
6. Conversación con el mercado

a. Ruta crítica de implementación

La ruta crítica de implementación depende de las siguientes decisiones y elementos fundamentales en el diseño del proyecto:

1. Modelo de negocio y principalmente la distribución de tareas entre el sector público y el privado por la diferencia en los tiempos de ambos
2. Estrategia legal, que incluye la definición de los mecanismos de delegación explicados en el subcapítulo anterior
3. Estrategia de financiación, que define las fuentes de financiación a usar y los procedimientos que en cada caso se deben surtir
4. Disponibilidad de terrenos en la ciudad para construir los patios y la infraestructura de recarga, dado que los autobuses eléctricos no pueden iniciar su operación sin esto
5. Disponibilidad de la infraestructura eléctrica y la capacidad requerida de la misma para la alimentación de los patios

En un caso tipo, basado en la experiencia de Bogotá, en la que se decidió por un modelo de negocio separado, las empresas privadas se encargan de proveer y operar los vehículos y la infraestructura, hay disponibilidad de terrenos para patios en la ciudad, se escogieron los contratos de concesión y de arriendo para la delegación de tareas, el financiamiento se da a través de las empresas privadas y la red de energía de la ciudad está acorde con las necesidades del sistema de transporte público, los plazos aproximados por actividad se muestran en la Figura 30.

En comparación con un proyecto de transporte público tradicional, la implementación de buses eléctricos puede llegar a tener una ruta crítica más larga principalmente porque: se debe conseguir la aprobación de invertir en un monto de recursos mayor; por el hecho de que sea una nueva tecnología menos probada en la ciudad, que a su vez requiere de análisis y revisiones adicionales y; por lo referente a la infraestructura de carga, que requiere, entre otras cosas, de validaciones del administrador de la red de energía de la ciudad para garantizar la energización de los puntos de recarga.

Figura 30 Cronograma de las actividades críticas de un proyecto de autobuses eléctricos. Caso Bogotá: Implementación de primera flota de autobuses eléctricos de Transmilenio.

Actividad principal	Elementos diferenciales del proyecto vs un proyecto de buses convencionales	Año 1, mes: 1	2	3	4	5
Planeación estratégica del proyecto	Evaluar planes y prioridades de los sectores de energía y medio ambiente y sector transporte. Se hace más complejo el proceso de toma de decisiones.					
Estructuración técnica, legal y financiera de la licitación	Proyectos de infraestructura generan retos adicionales. Definición de especificaciones de una tecnología nueva.					
Garantizar los recursos para financiar el proyecto	Volumen de inversión es mayor agregando complejidad.					
Proceso de licitación	Nuevas tecnologías e infraestructura de recarga generan dudas adicionales de parte de interesados.					
Búsqueda del terreno para la construcción del patio	Además de tamaño del terreno, debe cumplir normatividad urbana permita construir un patio y se debe verificar viabilidad de conexión a la red de distribución de energía eléctrica, así como estimación de costos asociado.					
Gestión de permisos para la construcción del patio	Tiempos de coordinación con entidad encargada de suministro de energía eléctrica.					
Construcción del patio	Energización del patio requiere de una gestión adicional.					
Fabricación de la flota	Construcción de la infraestructura de recarga requiere diseños y actividades adicionales.					
Pruebas de la flota	Pruebas adicionales y validación de prototipos.					
Inicio de la fase de operación y mantenimiento	Pruebas adicionales de la flota para su recepción y de manera general, se realizan ajustes al software de los vehículos para adecuarlos al contexto de la ciudad.					

Año 2, mes:	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Planeación estratégica del proyecto																				
Estructuración técnica, legal y financiera de la licitación																				
Garantizar los recursos para financiar el proyecto																				
Proceso de licitación																				
Búsqueda del terreno para la construcción del patio																				
Gestión de permisos para la construcción del patio																				
Construcción del patio																				
Fabricación de la flota																				
Pruebas de la flota																				
Inicio de la fase de operación y mantenimiento																				

Fuente: Autores

Referencias

(PNUMA), P. de las N. U. para el M. A. (2020). Movilidad eléctrica: Avances en América Latina y el Caribe y oportunidades para la colaboración regional 2019. 94. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/32830/MovilidadEléctrica_LAC.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Andersson, P. (2015). How to build and operate an efficient trolleybus system. UITP Trolleybus Committee, 24.

Ardila-Gomez, A., & Ortegon-Sanchez, A. (2016). Sustainable Urban Transport Financing from the Sidewalk to the Subway: Capital, Operations, and Maintenance Financing. In Sustainable Urban Transport Financing from the Sidewalk to the Subway: Capital, Operations, and Maintenance Financing. Washington, DC: World Bank. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-0756-5

Banco Interamericano de Desarrollo. (2020). Análisis y diseño de modelos de negocio y mecanismos de financiación para buses eléctricos en Lima, Perú.

CALSTART. (2021). Global Drive to Zero. Https://Globaldrivetozero.Org/. https://globaldrivetozero.org/tools/zero-emission-technology-inventory/

Dana Lowell, Dave Seamonds, and L. H. M. J. B. & A. J. D. and D. Q. D. C. M. R. and A. de L. I. E. S. (2020). Battery Electric Bus and Facilities Analysis (Issue January).

Díaz, R., Lugo, R., Páez, F., Mojica, C., & Corbacho, I. (2015). Oportunidades de financiamiento a operadores privados de transporte público en Latinoamérica 3 casos de estudio: Bogotá, Ciudad de México y Santiago. Banco Interamericano de Desarrollo, VII, 1–48.

Element Energy. (2018). A Study of the Impact of Electrification of Auckland ' s Bus Depots on the Local Electricity Grid (Vol. 44, Issue June).

Engel, Hauke Hertzke, P., & Siccardo, G. (2019). Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage. McKinsey and Company.

Erik, B. (2017). Battery Electric Buses 101.

European Automobile Manufacturers Association. (2017). Charging of Electric Buses - ACEA Recommendations. May, 4. https://www.oppcharge.org/dok/ACEA_charging_electric_buses.pdf

Geotab. (2020). What can 6,000 electric vehicles tell us about EV battery health? Electric Vehicles. https://www.geotab.com/blog/ev-battery-health/

Gómez Marcela Andrea, Rodriguez Jesús, Manuel, Hidalgo Dario, H. I. (2018). Sistemas de transporte público de Colombia: Retos oportunidades y estrategias de financiación. In Fondo de Desarrollo Nacional.

Hanlin, J., Reddaway, D., & Lane, J. (2018). TRCP Synthesis 130: Battery Electric Buses State of the Practice. In National Academies orfScience. TRB. https://doi.org/10.17226/25061

Johnson, C., Nobler, E., Eudy, L., Jeffers, M., Johnson, C., Nobler, E., Eudy, L., & Jeffers, M. (2020). Financial Analysis of Battery Electric Transit Buses. Nrel, June.

Karlsson, E. (2016). Charging infrastructure for electric city buses: An analysis of grid impact and costs. KTH, 73. http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:967688/FULLTEXT01.pdf

LABMOB. (2021). e-bus radas: Buses eléctricos en América Latina. Www.Ebusradar.Org/Es/. www.ebusradar.org/es/

Lalljie, A. (2018). Charging infrastructure Webinar - Planning for full fleet Electrification. PROTERRA. https://www.proterra.com/webinar/charging-infrastructure-webinar-planning-for-full-fleet-electrification/

Linscott Meredith, P. A. (2021). TCRP Research Report 219: Guidebook for Deploying Zero-Emission Transit Buses (2021). In National Academies orfScience. TRB. https://doi.org/10.17226/25842

Low Carbon Vehicle Partnership. (2016). THE LOW EMISSION Interactive version (L. C. V. Partnership (ed.); 3rd ed.). Low Carbon Vehicle Partnership. https://www.zemo.org.uk/assets/reports/LowCVP LEB Guide 2016 interactive V3.pdf

McKerracher Colin, Izadi-Najafabadi Ali, Aleksandra O'Donovan, A. N. (2020). Electric Vehicle Outlook 2020. BNEF Electric Vehicle Outlook. https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/

Ministerio de Energía, C. (2021). Plataforma de electromovilidad. Temporal.Indivisual.Cl. https://temporal.indivisual.cl/transporte-de-pasajeros/buses-electricos-red

Pihlatie, M., & Pippuri-Mäkeläinen, J. (2019). Electric Commercial Vehicles (ECV): Final report (No. 348; VTT Technology). https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2019/T348.pdf

PNUMA. (2019). Análisis y mitigación de barreras para el despliegue de autobuses eléctricos en Costa Rica.

Porcel, M. R., & Gordillo, F. (2018). Interoperabilidad en los Sistemas de Recaudo para Transporte Público en América Latina y el Caribe. Inter American Development Bank - IDB. https://publications.iadb.org/es/interoperabilidad-en-los-sistemas-de-recaudo-para-transporte-publico-en-america-latina-y-el-0%0Ahttps://publications.iadb.org/es/node/19377%0Ahttp://dx.doi.org/10.18235/0001813%0Ahttp://files/295/Gordillo y Sosa - 2019 - I

Randhahn, A., & Knote, T. (2020). Deployment of Charging Infrastructure for Battery Electric Buses. In Towards User-Centric Transport in Europe 2. (pp. 169–183). Towards User-Centric Transport in Europe 2. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38028-1_12

Sánchez Luis Gerardo, Fabela, Manuel de Jesús, Hernández José Ricardo, Flores Oscar, Vázquez David, C. M. (2020). Estado Del Arte De La Movilidad Eléctrica En México. Publicación Técnica, 596(596). https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt596.pdf

Shyamasis Das , Chandana Sasidharan, A. R. (2019). Chargin India's bus transport. Aliance Fo an Energy Economy, 62.

The Larson Instititue. (2015). Federal Transit Bus Test - New Flyer XE40. FEDERAL TRANSIT BUS TEST, 7(814). https://www.altoonabustest.psu.edu/

The Larson Institute, & PennState. (2014). Federal Transit Bus Test - BYD Electric Bus. Report Number LTI-BT-R1307, 7(814), 695–3404. http://altoonabustest.psu.edu/buses/reports/441.pdf?1340301410

The Thomas Institute. (2015). Federal Transit Bus Test: Proterra, Inc. Model BE40. FEDERAL TRANSIT BUS TEST, 7(814). https://www.altoonabustest.psu.edu/

University of Tennessee. (2021). Electric Vehicles. College of Engineering and Computer Science. https://new.utc.edu/engineering-and-computer-science/research-and-labratories/cete/electric-vehicles

Volvo Bus Corporation. (n.d.). FAST CHARGING OF ELECTRIC VEHICLES. OppCharge.Org. Retrieved May 25, 2021, from https://www.oppcharge.org/

WRI México. (2019). Entrevista con proveedores de vehículos eléctricos. No publicado.

Anexo

Tabla 6 Flotas de autobuses eléctricos en ALyC desagregadas por ciudad, marca, tipología, tecnología y año de implementación:

	País	Ciudad (país)	Sistema	Fecha de inicio de operación	# de vehículos eléctricos	Tipología	Estatus	Tecnología
	Argentina							
1	Argentina	Rosario	Línea Q, MOVI	2015-2017	12	12m	Operación	Trolebús nueva generación
2	Argentina	Rosario	Línea K, MOVI	1994	20	12m	Operación	Trolebús
3	Argentina	Mendoza	líneas 110 y 120 (STM)	2019	12	12m	Operación	Eléctrico de baterías
4	Argentina	Mendoza	líneas 110 y 120 (STM)	2019	6	12m	Operación	Eléctrico de baterías

	País	Ciudad (país)	Sistema	Fecha de inicio de operación	# de vehículos eléctricos	Tipología	Estatus	Tecnología
5	Argentina	Mendoza	STM	2013	13	12m	Operación	Trolebús nueva generación
6	Argentina	Mendoza	STM	ND	32	12m	Operación	Trolebús
7	Argentina	Córdoba	TAMSE Líneas A, B y C	2014	7	12m	Operación	Trolebús
8	Argentina	Córdoba	TAMSE Líneas A, B y C	1990	32	12m	Operación parcial	Trolebús
9	Argentina	Córdoba	TAMSE Líneas A, B y C	1992	12	18m	Operación parcial	Trolebús
	Barbados							
10	Barbados	Bridgetown	Transport Board	2020	33	10m	Operación	Eléctrico de baterías
	Brasil							
11	Brasil	São Paulo	SPtrans, linha 6030/10	2019	17	12m	Operación	Eléctrico de baterías
12	Brasil	Campinas	SPtrans, linha 6030/10	2018	17	12m	Operación	Eléctrico de baterías
13	Brasil	São Paulo	SPtrans	2007-2014	201	12m	Operación	Trolebús
14	Brasil	São Paulo, RM	EMTU, Corredor Metropolitano ABD (semiexclusivo)	2007-2014	85	12m	Operación	Trolebús
	Chile							
15	Chile	Santiago	Transantiago	2017-219	435	12m	Operación	Eléctrico de baterías

	País	Ciudad (país)	Sistema	Fecha de inicio de operación	# de vehículos eléctricos	Tipología	Estatus	Tecnología
16	Chile	Santiago	Transantiago	2017-219	100	12m	Operación	Eléctrico de baterías
17	Chile	Santiago	Transantiago	2017-219	215	12m	Operación	Eléctrico de baterías
18	Chile	Santiago	Transantiago	2017-219	26	12m	Operación	Eléctrico de baterías
	Colombia							
19	Colombia	Cali	MIO - ByN	2019	26	9m	Operación	Eléctrico de baterías
20	Colombia	Cali	MIO - GIT	2020	9	9m	Previsto	Eléctrico de baterías
21	Colombia	Medellín	Metroplús	2019	64	12m	Operación	Eléctrico de baterías
22	Colombia	Bogotá	Transmilenio	2019	306	12m	Operación	Eléctrico de baterías
23	Colombia	Bogotá	Transmilenio	2019	73	9m	Operación	Eléctrico de baterías
24	Colombia	Bogotá	Transmilenio	2020	91	12m	Operación	Eléctrico de baterías
25	Colombia	Bogotá	Transmilenio	2020	13	12m	Operación	Eléctrico de baterías
26	Colombia	Bogotá	Transmilenio	2021	135	12m	Previsto	Eléctrico de baterías
27	Colombia	Bogotá	Transmilenio	2021	271	9m	Previsto	Eléctrico de baterías

	País	Ciudad (país)	Sistema	Fecha de inicio de operación	# de vehículos eléctricos	Tipología	Estatus	Tecnología
28	Colombia	Bogotá	Transmilenio	2021	195	12m	Previsto	Eléctrico de baterías
29	Colombia	Bogotá	Transmilenio	2021	401	9m	Previsto	Eléctrico de baterías
	México							
30	México	Ciudad de México	Metrobús (Línea 3)	2021	9	18m piso alto	Pre-operación	Eléctrico de baterías
31	México	Ciudad de México	STE	2020	50	18m piso bajo	Operación	Trolebús nueva generación
32	México	Ciudad de México	STE	2019-2020	143	12m	Operación	Trolebús nueva generación
33	México	Ciudad de México	STE	1975-1998	100	12m	Operación	Trolebús
34	México	Guadalajara	SITEUR	2016	25	12m	Operación	Trolebús nueva generación
35	México	Guadalajara	SITEUR	2021	38	9m	Pre-operación	Eléctrico de baterías
	Uruguay							
36	Uruguay	Montevideo	Cutcsa y cooperativas Rutas CA1, D1 y 14	2020	20	12m	Operación	Eléctrico de baterías
37	Uruguay	Montevideo	Cutcsa y cooperativas Rutas CA1, D1 y 14	2020	10	12m	Operación	Eléctrico de baterías

Fuente: Autores con base en referencias y consultas telefónicas con autoridades y empresas.

Tabla 7 Flotas de autobuses eléctricos en ALyC desagregadas por ciudad, marca, tipología, tecnología y año de implementación: especificaciones técnicas

	País	Ciudad (país)	Tipología	Tecnología	Marca y Modelo	Capacidad de las baterías (kWh)	Tipo de baterías	Sistema de recarga	Costo por unidad (USD valores constantes)
	Argentina								
1	Argentina	Rosario	12m	Trolebús nueva generación	Trolza Megapolis	15.8	LFP	Catenarias aéreas 600 V CC	341,667
2	Argentina	Rosario	12m	Trolebús	POWERTRONICS / AVIBRAS/ Volvo / Marcoopolo	NA	S/N	Catenarias aéreas 600 V CC	ND
3	Argentina	Mendoza	12m	Eléctrico de baterías	BYD, K9	324	LFP	80 kW□40 kW×2	400,000
4	Argentina	Mendoza	12m	Eléctrico de baterías	Zhong Tong / Corven	324	LFP	80 kW□40 kW×2	411,845
5	Argentina	Mendoza	12m	Trolebús nueva generación	Materfer	NA	S/N	Catenarias aéreas 600 V CC	250,000
6	Argentina	Mendoza	12m	Trolebús	ND	NA	S/N	Catenarias aéreas 600 V CC	ND
7	Argentina	Córdoba	12m	Trolebús	Trolza - Market	NA	S/N	Catenarias aéreas 600 V CC	ND
8	Argentina	Córdoba	12m	Trolebús	ZiU (Zavod imeni Uritskogo, actual TROLZA), generación 9, modelo 682b	NA	S/N	Catenarias aéreas 600 V CC	ND
9	Argentina	Córdoba	18m	Trolebús	ZiU (Zavod imeni Uritskogo, actual TROLZA), generación 10, modelo 683c.	NA	S/N	Catenarias aéreas 600 V CC	ND
	Barbados								
10	Barbados	Bridgetown	10m	Eléctrico de baterías	BYD K9	ND	LFP	Conector 80 kW 40 kW×2)	ND
	Brasil								
11	Brasil	São Paulo	12m	Eléctrico de baterías	BYD D9W	324	LFP	Conector 80 kW□40 kW×2)	350,000
12	Brasil	Campinas	12m	Eléctrico de baterías	BYD K9	324	LFP	Conector 80 kW□40 kW×2)	350,000
13	Brasil	São Paulo	12m	Trolebús	WEG y Eletra (Chasis por MAN, Busscar, Scania MB)	NA	S/N	Catenarias aéreas 600-700 V CC	200,000
14	Brasil	São Paulo, RM	12m	Trolebús	WEG y Eletra (Chasis por MAN, Busscar, Scania MB)	NA	S/N	Catenarias aéreas 600-700 V CC	200,000
	Chile								
15	Chile	Santiago	12m	Eléctrico de baterías	BYD K9 FE	276	LFP	Conector 80 kW x 1	321,000
16	Chile	Santiago	12m	Eléctrico de baterías	Yutong E12 LF o ZK6128BEVG	324	LFP	Conector 75 kW×1	321,000
17	Chile	Santiago	12m	Eléctrico de baterías	Foton Ebus U12 SC	385	LFP	Conector 150 kW x1	321,000
18	Chile	Santiago	12m	Eléctrico de baterías	KingLong	374	LFP	Conector 150 kW (3x50kWDC)	321,000
	Colombia								
19	Colombia	Cali	9m	Eléctrico de baterías	Sunwin	250	LFP	156kW x2 DC	150,000

	País	Ciudad (país)	Tipología	Tecnología	Marca y Modelo	Capacidad de las baterías (kWh)	Tipo de baterías	Sistema de recarga	Costo por unidad (USD valores constantes)
20	Colombia	Cali	9m	Eléctrico de baterías	BYD	215	LFP	100W x2 DC	150,000
21	Colombia	Medellín	12m	Eléctrico de baterías	BYD K9	324	LFP	210 kW x2 DC	357,000
22	Colombia	Bogotá	12m	Eléctrico de baterías	X	324	LFP	Conector 150 kW (2x75 kWDC)	328,133
23	Colombia	Bogotá	9m	Eléctrico de baterías	X	240	LFP	Conector 150 kW (2x75 kWDC)	250,132
24	Colombia	Bogotá	12m	Eléctrico de baterías	BYD	324	LFP	Conector 150 kW (2x75 kWDC)	328,133
25	Colombia	Bogotá	12m	Eléctrico de baterías	Yutong	324	LFP	Conector 150 kW (2x75 kWDC)	328,133
26	Colombia	Bogotá	12m	Eléctrico de baterías	BYD	324	LFP	Conector 150 kW (2x75 kWDC)	328,133
27	Colombia	Bogotá	9m	Eléctrico de baterías	BYD	240	LFP	Conector 150 kW (2x75 kWDC)	250,132
28	Colombia	Bogotá	12m	Eléctrico de baterías	BYD	324	LFP	Conector 150 kW (2x75 kWDC)	328,133
29	Colombia	Bogotá	9m	Eléctrico de baterías	BYD	240	LFP	Conector 150 kW (2x75 kWDC)	250,132
	México								
30	México	Ciudad de México	18m piso alto	Eléctrico de baterías	Yutong	563	LFP	Conector 150 kW (2x75 kWDC)	750,000
31	México	Ciudad de México	18m piso bajo	Trolebús nueva generación	Yutong	150	LFP	Catenarias aéreas 600 V CC	650,000

	País	Ciudad (país)	Tipología	Tecnología	Marca y Modelo	Capacidad de las baterías (kWh)	Tipo de baterías	Sistema de recarga	Costo por unidad (USD valores constantes)
32	México	Ciudad de México	12m	Trolebús nueva generación	Yutong	125	LFP	Catenarias aéreas 600 V CC	322,000
33	México	Ciudad de México	12m	Trolebús	New Flyer, Toshiba, Mitsubishi, Kiepe	NA	LFP	Catenarias aéreas 600 V CC	ND
34	México	Guadalajara	12m	Trolebús nueva generación	DINA (Skoda)	35	LFP	Catenarias aéreas 600 V CC	416,667
35	México	Guadalajara	9m	Eléctrico de baterías	Sunwin	250	LFP	120kW x2 DC	ND
	Uruguay								
36	Uruguay	Montevideo	12m	Eléctrico de baterías	BYD K9	ND	LFP	Conector 80 kW 40 kW×2)	ND
37	Uruguay	Montevideo	12m	Eléctrico de baterías	Yutong	ND	LFP	Conector 80 kW 40 kW×2)	ND

Fuente: Autores con base en referencias y consultas telefónicas con autoridades y empresas.

Tabla 8 Flotas de autobuses eléctricos en ALyC desagregadas por ciudad, marca, tipología, tecnología y año de implementación: Modelos de implementación.

	País	Ciudad (país)	Fecha de inicio de operación	# de vehículos eléctricos	Tecnología	Mecanismo de implementación	Modelo de adquisición de autobuses	Modelo de adquisición baterías *	Modelo de implementación de sistemas de recarga e infraestructura de patios	Modelo de pago de operación
	Argentina									

	País	Ciudad (país)	Fecha de inicio de operación	# de vehículos eléctricos	Tecnología	Mecanismo de implementación	Modelo de adquisición de autobuses	Modelo de adquisición baterías *	Modelo de implementación de sistemas de recarga e infraestructura de patios	Modelo de pago de operación
1	Argentina	Rosario	2015-2017	12	Trolebús nueva generación	Empresa operadora pública, Inversión y operación pública	Adquisición con inversión pública	Adquisición en conjunto con buses	Infraestructura pública existente previamente	Tarifa + subsidio fondos públicos
2	Argentina	Rosario	1994	20	Trolebús	Empresa operadora pública, Inversión y operación pública	Adquisición con inversión pública	NA	Infraestructura pública existente previamente	Tarifa + subsidio fondos públicos
3	Argentina	Mendoza	2019	12	Eléctrico de baterías	Empresa operadora pública, Inversión y operación pública	Adquisición con inversión pública	Adquisición en conjunto con buses	Adquisición con inversión pública	Tarifa + subsidio fondos públicos
4	Argentina	Mendoza	2019	6	Eléctrico de baterías	Empresa operadora pública, Inversión y operación pública	Adquisición con inversión pública	Adquisición en conjunto con buses	Adquisición con inversión pública	Tarifa + subsidio fondos públicos
5	Argentina	Mendoza	2013	13	Trolebús nueva generación	Empresa operadora pública, Inversión y operación pública	Adquisición con inversión pública	NA	Infraestructura pública existente previamente	Tarifa + subsidio fondos públicos
6	Argentina	Mendoza	ND	32	Trolebús	Empresa operadora pública, Inversión y operación pública	Adquisición con inversión pública	NA	Infraestructura pública existente previamente	Tarifa + subsidio fondos públicos

	País	Ciudad (país)	Fecha de inicio de operación	# de vehículos eléctricos	Tecnología	Mecanismo de implementación	Modelo de adquisición de autobuses	Modelo de adquisición baterías *	Modelo de implementación de sistemas de recarga e infraestructura de patios	Modelo de pago de operación
7	Argentina	Córdoba	2014	7	Trolebús	Empresa operadora pública, Inversión y operación pública	Adquisición con inversión pública	NA	Infraestructura pública existente previamente	Tarifa + subsidio fondos públicos
8	Argentina	Córdoba	1990	32	Trolebús	Empresa operadora pública, Inversión y operación pública	Adquisición con inversión pública	NA	Infraestructura pública existente previamente	Tarifa + subsidio fondos públicos
9	Argentina	Córdoba	1992	12	Trolebús	Empresa operadora pública, Inversión y operación pública	Adquisición con inversión pública	NA	Infraestructura pública existente previamente	Tarifa + subsidio fondos públicos
	Barbados									
10	Barbados	Bridgetown	2020	33	Eléctrico de baterías	Empresa operadora pública, Inversión y operación pública	Adquisición con inversión pública	Adquisición en conjunto con buses	Adquisición con inversión pública	ND
	Brasil									

	País	Ciudad (país)	Fecha de inicio de operación	# de vehículos eléctricos	Tecnología	Mecanismo de implementación	Modelo de adquisición de autobuses	Modelo de adquisición baterías *	Modelo de implementación de sistemas de recarga e infraestructura de patios	Modelo de pago de operación
11	Brasil	São Paulo	2019	17	Eléctrico de baterías	Alianza estratégica de Concesión de Operación de Transporte con Empresa de Energía	Financiamiento privado por operador	Adquisición en conjunto con buses	Adquisición en conjunto con buses con inversión privada	Tarifa + subsidio fondos públicos
12	Brasil	Campinas	2018	17	Eléctrico de baterías	Alianza estratégica de Concesión de Operación de Transporte con Empresa de Energía	Financiamiento privado por operador	Adquisición en conjunto con buses	Adquisición en conjunto con buses con inversión privada	Tarifa
13	Brasil	São Paulo	2007-2014	201	Trolebús	Concesión operación de transporte integral	Financiamiento privado por operador	NA	Infraestructura pública existente previamente	Tarifa + subsidio fondos públicos
14	Brasil	São Paulo, RM	2007-2014	85	Trolebús	Concesión operación de transporte integral	Financiamiento privado por operador	NA	Infraestructura pública existente previamente	Tarifa + subsidio fondos públicos
	Chile									
15	Chile	Santiago	2017-219	435	Eléctrico de baterías	Alianza estratégica de Concesión de Operación de Transporte con Empresa de Energía	Financiamiento privado por operador	Adquisición en conjunto con buses	Financiamiento privado por operador	Tarifa + subsidio fondos públicos

	País	Ciudad (país)	Fecha de inicio de operación	# de vehículos eléctricos	Tecnología	Mecanismo de implementación	Modelo de adquisición de autobuses	Modelo de adquisición baterías *	Modelo de implementación de sistemas de recarga e infraestructura de patios	Modelo de pago de operación
16	Chile	Santiago	2017-219	100	Eléctrico de baterías	Alianza estratégica de Concesión de Operación de Transporte con Empresa de Energía	Financiamiento privado por operador	Adquisición en conjunto con buses	Financiamiento privado por operador	Tarifa + subsidio fondos públicos
17	Chile	Santiago	2017-219	215	Eléctrico de baterías	Alianza estratégica de Concesión de Operación de Transporte con Empresa de Energía	Financiamiento privado por operador	Adquisición en conjunto con buses	Financiamiento privado por operador	Tarifa + subsidio fondos públicos
18	Chile	Santiago	2017-219	26	Eléctrico de baterías	Alianza estratégica de Concesión de Operación de Transporte con Empresa de Energía	Financiamiento privado por operador	Adquisición en conjunto con buses	Financiamiento privado por operador	Tarifa + subsidio fondos públicos
	Colombia									
19	Colombia	Cali	2019	26	Eléctrico de baterías	Alianza estratégica de Concesión de Operación de Transporte con Empresa de Energía	Financiamiento privado por operador	Adquisición en conjunto con buses	Financiamiento privado por operador	Tarifa + subsidio fondos públicos
20	Colombia	Cali	2020	9	Eléctrico de baterías	Concesión operación de transporte integral	Financiamiento privado por operador	Adquisición en conjunto con buses	Financiamiento privado por operador	Tarifa + subsidio fondos públicos

	País	Ciudad (país)	Fecha de inicio de operación	# de vehículos eléctricos	Tecnología	Mecanismo de implementación	Modelo de adquisición de autobuses	Modelo de adquisición baterías *	Modelo de implementación de sistemas de recarga e infraestructura de patios	Modelo de pago de operación
21	Colombia	Medellín	2019	64	Eléctrico de baterías	Empresa operadora pública, Inversión y operación pública	Adquisición con inversión pública	Adquisición en conjunto con buses	Adquisición con inversión pública	Tarifa + subsidio fondos públicos
22	Colombia	Bogotá	2019	306	Eléctrico de baterías	Modelo con operador de flota separado de provisión de flota separado de provisión de patios	Financiamiento privado por proveedor	Adquisición en conjunto con buses	Financiamiento privado por proveedor de patio	Tarifa + subsidio fondos públicos
23	Colombia	Bogotá	2019	73	Eléctrico de baterías	Modelo con operador de flota separado de provisión de flota separado de provisión de patios	Financiamiento privado por proveedor	Adquisición en conjunto con buses	Financiamiento privado por proveedor de patio	Tarifa + subsidio fondos públicos
24	Colombia	Bogotá	2020	91	Eléctrico de baterías	Concesión operación de transporte integral	Financiamiento privado por operador	Adquisición en conjunto con buses	Financiamiento privado por de patio	Tarifa + subsidio fondos públicos
25	Colombia	Bogotá	2020	13	Eléctrico de baterías	Concesión operación de transporte integral	Financiamiento privado por operador	Adquisición en conjunto con buses	Adquisición en conjunto con buses con inversión privada	Tarifa + subsidio fondos públicos
26	Colombia	Bogotá	2021	135	Eléctrico de baterías	Modelo con operador de flota separado de provisión de flota	Financiamiento privado por proveedor	Adquisición en conjunto con buses	Financiamiento privado por operador	Tarifa + subsidio fondos públicos

	País	Ciudad (país)	Fecha de inicio de operación	# de vehículos eléctricos	Tecnología	Mecanismo de implementación	Modelo de adquisición de autobuses	Modelo de adquisición baterías *	Modelo de implementación de sistemas de recarga e infraestructura de patios	Modelo de pago de operación
27	Colombia	Bogotá	2021	271	Eléctrico de baterías	Modelo con operador de flota separado de provisión de flota	Financiamiento privado por proveedor	Adquisición en conjunto con buses	Financiamiento privado por operador	Tarifa + subsidio fondos públicos
28	Colombia	Bogotá	2021	195	Eléctrico de baterías	Modelo con operador de flota separado de provisión de flota	Financiamiento privado por proveedor	Adquisición en conjunto con buses	Financiamiento privado por proveedor de buses	Tarifa + subsidio fondos públicos
29	Colombia	Bogotá	2021	401	Eléctrico de baterías	Modelo con operador de flota separado de provisión de flota	Financiamiento privado por proveedor	Adquisición en conjunto con buses	Financiamiento privado por proveedor de buses	Tarifa + subsidio fondos públicos
	México									
30	México	Ciudad de México	2021	9	Eléctrico de baterías	Modelo con operador de flota separado de provisión de flota	Financiamiento privado por proveedor	Adquisición en conjunto con buses	Financiamiento privado por proveedor de buses	Tarifa + subsidio fondos públicos
31	México	Ciudad de México	2020	50	Trolebús nueva generación	Empresa operadora pública, Inversión y operación pública	Adquisición con inversión pública	NA	Infraestructura pública existente previamente	Tarifa + subsidio fondos públicos

	País	Ciudad (país)	Fecha de inicio de operación	# de vehículos eléctricos	Tecnología	Mecanismo de implementación	Modelo de adquisición de autobuses	Modelo de adquisición baterías *	Modelo de implementación de sistemas de recarga e infraestructura de patios	Modelo de pago de operación
32	México	Ciudad de México	2019-2020	143	Trolebús nueva generación	Empresa operadora pública, Inversión y operación pública	Adquisición con inversión pública	NA	Infraestructura pública existente previamente	Tarifa + subsidio fondos públicos
33	México	tCiudad de México	1975-1998	100	Trolebús	Empresa operadora pública, Inversión y operación pública	Adquisición con inversión pública	NA	Infraestructura pública existente previamente	Tarifa + subsidio fondos públicos
34	México	Guadalajara	2016	25	Trolebús nueva generación	Empresa operadora pública, Inversión y operación pública	Adquisición con inversión pública	NA	Infraestructura pública existente previamente	Tarifa + subsidio fondos públicos
35	México	Guadalajara	2021	38	Eléctrico de baterías	Empresa operadora pública, Inversión y operación pública	Arrendamiento con presupuesto público	Adquisición en conjunto con buses	Arrendamiento con presupuesto público, en conjunto con vehículos	Tarifa + subsidio fondos públicos
	Uruguay									
36	Uruguay	Montevideo	2020	20	Eléctrico de baterías	Concesión operación de transporte integral	Financiamiento privado por operador	Adquisición en conjunto con buses	Adquisición en conjunto con buses con inversión privada	Tarifa + subsidio fondos públicos

	País	Ciudad (país)	Fecha de inicio de operación	# de vehículos eléctricos	Tecnología	Mecanismo de implementación	Modelo de adquisición de autobuses	Modelo de adquisición baterías *	Modelo de implementación de sistemas de recarga e infraestructura de patios	Modelo de pago de operación
37	Uruguay	Montevideo	2020	10	Eléctrico de baterías	Concesión operación de transporte integral	Financiamiento privado por operador	Adquisición en conjunto con buses	Adquisición en conjunto con buses con inversión privada	Tarifa + subsidio fondos públicos

Fuente: Autores con base en referencias y consultas telefónicas con autoridades y empresas.

Glosario

A continuación, se presenta las definiciones empleadas desde la autoría de este documento, con base en las convenciones internacionales o conceptos generales obtenidas de las fuentes citadas.

ALyC América Latina y el Caribe

ACB Análisis Costo Beneficio

APP Asociación Público Privada

Autonomía de operación: Es la distancia que puede recorrer un auto eléctrico con una sola carga de batería.

BANOBRAS Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos (México)

BEB Autobuses eléctricos de baterías (por sus siglas en inglés: Battery electric bus)

Bloques de operación Un bloque es la asignación de trabajo para un solo vehículo durante un día de trabajo de servicio (TCRP 30, TRB, 1998)

BRT Por sus siglas en inglés Bus Rapid Tránsit, se refiere a un sistema de transporte masivo o de alta capacidad basado en autobuses, carriles de uso exclusivo, estaciones o paradas, prepago, acceso a los vehículos a nivel de la plataforma de espera y otras estrategias para el embarque ágil de pasajeros y la mayor eficiencia y capacidad de transporte del sistema.

CAPEX Costos de capital de un proyecto, generalmente se refiere a los costos de adquisición e implementación

Celdas de batería Es la unidad mínima de una batería, compuesta por 4 componentes que incluyen cátodo, ánodo, electrolito y separador.

CI Combustión Interna

Ciclo de manejo Un ciclo de conducción es una serie de valores que representan la velocidad de un vehículo y otras características de la operación de un vehículo en función del tiempo.

CMNUCC Convención Marco de las Naciones Unidades sobre el Cambio Climático

Co-beneficios También entendidos como "beneficios secundarios", "beneficios colaterales" y "beneficios asociados" (IPCC, 2001).

CONPES Consejo Nacional de Política Económica y Social (Colombia)

CMNUCC Convención Marco de las Naciones Unidades sobre el Cambio Climático

CTP Costo total de propiedad, también referido como TCO (por sus siglas en inglés: Total Cost of Ownership)

Densidad de energía: Medida de cuánta energía contiene una batería en proporción a su peso, normalmente expresada en vatios-hora por kilogramo (Wh/kg), (Karlsson, 2016).

Densidad de potencia Medida de la capacidad de carga o descarga de una batería en función de su peso. [W/kg], (Karlsson, 2016).

Eficiencia energética En su concepción general significa, la eficiencia energética significa usar menos energía para hacer el mismo trabajo y, en el proceso, reducir las facturas de energía y reducir la contaminación. En el ámbito de los vehículos motorizados, se refiere al menor consumo energético para desplazarse una misma distancia.

ENME Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica (México)

EV Vehículo eléctrico. Se refiera a los vehículos cuya principal fuente de movimiento es un motor eléctrico que se alimenta mediante celdas de baterías, celdas de hidrógeno o mediante corriente continua.

Fondos de inversión Los fondos de inversión son productos de inversión creados con el único propósito de reunir capital de inversionistas e usar el recurso colectivamente a través de una cartera de instrumentos financieros.

Fuente de tracción Se refiere a la fuente de energía empleada por un vehículo para generar movimiento.

Homologación de vehículos Procedimiento mediante el cual se verifica que un modelo de vehículo cumple con la normatividad aplicables de un país, ciudad o cliente en particular.

Índice de pasajeros por bus - IPB Índice de productividad de los sistemas de transporte público referente a la relación de pasajeros embarcados en el sistema en cierta unidad de tiempo (generalmente en día útil) por vehículos en servicio u operativos.

Índice de Pasajeros por Kilómetro - IPK Índice de productividad de los sistemas de transporte público referente a los pasajeros embarcados en el sistema por kilómetro de servicio recorrido, en la misma unidad de tiempo

Intensidad de corriente Se conoce como la carga que pasa por un conductor por unidad de tiempo, medida generalmente en Amperes (A).

LFP Baterías de ion litio-ferrofosfato

Motor de combustión interna Es un tipo de motor que permite generar energía mecánica o movimiento mediante la liberación de energía química de los combustibles, obtenida por la combustión o explosión de éstos al interior de los motores.

NMC Níquel-manganeso cobalto

NCA Níquel-cobalto-aluminio

OCDE Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico

ODS Objetivos de Desarrollo Sostenible

OMS Organización Mundial de la Salud

OPEX Costos de operación de un proyecto, generalmente asociados a la operación, salarios, mantenimiento, seguros, descarte, valor de rescate o residual, entre otros.

Orografía Se refiere a las diferentes elevaciones que se presentan en un territorio, área o región en específico.

Paquete de batería o pack de baterías. Conjunto de celdas de baterías que integran para alimentar un

PEN Plan Energético Nacional (Colombia)

Persona - camión Se refiere a un modelo de operación de sistemas de transporte ampliamente generalizados en América Latina y otras partes del mundo en donde una persona posé de 1 a 10 vehículos autorizados para la prestación del servicio de transporte, y que son operados por si mismo, o por un grupo de subarrendatarios, significando un alto grado de fragmentación del servicio. Generalmente, estos modelos presentan relaciones informales y baja participación de las autoridades en el control y regulación del servicio.

PHEV o PHEB Vehículos o buses híbridos enchufables (por sus siglas en inglés: plug in electric vehicles, o plug in electric buses), se diferían de otros vehículos híbridos al tener la opción de recargarse con un cargador enchufable, para recargar sus baterías que, en este tipo de vehículos, son la principal fuente de energía.

PNUMA Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

Potencia eléctrica Puede ser definida como la tasa a la que la energía se transforma o se transfiere en el tiempo. Su unidad de medida son los Joules por segundo, también conocidos como watts (W). En los circuitos eléctricos la potencia (P) es el producto de la tensión (V) y la intensidad de la corriente (I): P = V * I

PRODESEN Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (México)

PROTRAM Programa de Apoyo Federal al Trasporte Masivo

Protocolo de pruebas Son un conjunto de prueba que verifican el funcionamiento de un elemento específico del sistema o del sistema en su conjunto y son usados como parte de los procesos de fabricación, entrega y aceptación de productos.

Pruebas demostrativas Tipo de pruebas de vehículos, en donde los fabricantes realizaron el préstamo de 1 vehículo (generalmente) por un tiempo suficiente para validar sus parámetros de operación dentro de un sistema de transporte.

Recarga por inducción Transferencia inalámbrica de carga eléctrica por inducción estática o dinámica.

SCT Secretaría de Comunicaciones y Transporte (México)

SEMARNAT Secretaría de Medio ambiente y Recursos Naturales (México)

SOC Estado de carga de una batería (por sus siglas en inglés: State of charge)

SOH Estado de degradación de la batería (por sus siglas en inglés: State of health)

Subestación eléctrica Son instalaciones que forman parte de las redes de generación, transmisión y distribución de electricidad y que son usadas principalmente para transforman el voltaje.

TB Trolebús

TCO Costo total de propiedad (por sus siglas en inglés: Total Cost of Ownership)

Torque En un vehículo el torque representa la capacidad de éste para mover su peso. De forma general, puede ser definido como la fuerza aplicada a una palanca para hacer girar una pieza.

Tren motriz Es el sistema del vehículo que permite transformar la energía del combustible o celda de batería en movimiento. Generalmente consiste en motor, transmisión, eje de transmisión, ejes y diferencial.

Vehículo híbrido Son vehículos que tiene dos fuentes de energía empleadas para producir movimiento, en general un motor eléctrico alimentado por baterías y un motor de combustión interna alimentado de combustible fósil. Existen diferentes tecnologías de vehículos híbridos que implican variaciones en la proporción de uso de las diferentes fuentes de energía.

Vehículos enchufables Suele referirse a vehículos eléctricos y vehículos híbridos cuyo método de recarga son cargadores de enchufe, conector o plug in (en inglés).

Voltaje Es la magnitud que expresa la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos. Se mide en voltios (V) y también es conocido como diferencial de potencial o tensión eléctrica.