

Desafíos operacionales y soluciones a la integración de buses eléctricos: lecciones de Cali, Colombia

División de Transporte
División de Cambio Climático

Autores:

Marcela Castillo
Sebastián Galarza
Juanita Concha Rivera
Felipe García
Benoît Lefèvre
Gibet Camós
Fanny Bertossi
Paula Cruz

NOTA TÉCNICA N°
IDB-TN-2294

Octubre 2021



BID

Banco Interamericano
de Desarrollo

Desafíos operacionales y soluciones a la integración de buses eléctricos: lecciones de Cali, Colombia

Autores:

Marcela Castillo

Sebastián Galarza

Juanita Concha Rivera

Felipe García

Benoît Lefèvre

Gibet Camós

Fanny Bertossi

Paula Cruz

Banco Interamericano de Desarrollo
División de Transporte
División de Cambio Climático

Octubre 2021

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

Desafíos operacionales y soluciones a la integración de buses eléctricos: lecciones de Cali, Colombia / Marcela Castillo, Sebastián Galarza, Juanita Concha Rivera, Felipe García, Benoît Lefèvre, Gibet Camós, Fanny Bertossi, Paula Cruz.

p. cm. — (Nota técnica del BID ; 2294)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Buses, Electric-Colombia. 2. Electric vehicles-Colombia. 3. Urban transportation-Colombia. I. Castillo, Marcela. II. Galarza, Sebastián. III. Concha Rivera, Juanita. IV. García, Felipe. V. Lefèvre, Benoît. VI. Camós, Gibet. VII. Bertossi, Fanny. VIII. Cruz, Paula. IX. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Transporte. X. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático. XI. Serie.

IDB-TN-2294

Códigos JEL: L91, I14, R41

Palabras clave: electromovilidad, buses eléctricos, transporte público, movilidad sostenible

<http://www.iadb.org>

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

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

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

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



Desafíos operacionales y soluciones a la integración de buses eléctricos:

lecciones de Cali, Colombia



Desafíos operacionales y soluciones a la integración de buses eléctricos: lecciones de Cali, Colombia

Marcela A. Castillo
Sebastián Galarza
Juanita Concha Rivera
Felipe García
Fanny Bertossi
Benoit Lefèvre
Gibet Camós
Paula Cruz



Los últimos cinco años han presentado un cambio importante en los procesos de renovación de las flotas de sistemas de transporte público de ALC, donde los buses eléctricos representan una opción cada vez más viable para sustituir los buses del transporte colectivo convencional. En Colombia, este proceso comenzó con la integración de 26 buses eléctricos a la flota del SITM de Cali, siendo la primera ciudad del país en contar con una flota eléctrica para sus servicios de transporte público. Uno de los casos más emblemáticos la región, es la adjudicación de más de 1.400 unidades nuevas de buses eléctricos para el sistema de transporte público de Bogotá. Esto ha permitido generar una creciente experiencia de parte de autoridades, concesionarios y otros actores del transporte público con la operación y mantenimiento de flota eléctrica y sus sistemas de carga. Al mismo tiempo, estos procesos han permitido constatar las ventajas comparativas de la tecnología respecto a las operaciones de transporte público, pero también a identificar las brechas que se deben suplir para crear las condiciones propicias para una masificación de esta tecnología en el corto y mediano plazo.

Dentro de las principales brechas identificadas se encuentran las relacionadas a la infraestructura de carga, donde la interoperabilidad junto con la determinación de los estándares de carga y comunicación son unos de los primeros retos que deben abordar las autoridades pertinentes. Otro de los retos diagnosticados tiene relación con la planificación de las operaciones, asignación y programación de la flota, la cual debería ser elaborada con base a modelaciones o datos concretos del consumo de energía del bus operando en cada una de las rutas, junto con la elaboración de una lógica operacional que incluya la programación de eventos de recarga. En términos de mantenimiento y monitoreo de flota es fundamental acceder a parámetros del CAN bus para poder realizar un correcto monitoreo de la batería y desarrollar así un plan de seguimiento con los principales parámetros operacionales, al igual que un plan de monitoreo de los cargadores.

Finalmente, el desarrollo de capacidades en el país es de suma importancia para una correcta implementación y masificación de la electromovilidad, es por ello necesario elaborar programas de capacitación y entrenamiento para conductores, mantenedores y operadores del transporte público, al igual que para los planeadores y tomadores de decisión..

Keywords: electromovilidad, buses eléctricos, transporte público, movilidad sostenible

Reconocimientos

Esta asistencia técnica “Entendimiento, planeación e implementación de la movilidad eléctrica en el sistema de transporte público Santiago de Cali MIO” fue proveída a Metro Cali y comisionada por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) bajo la cooperación técnica regional RG-T3078 que apoya la adopción de buses eléctricos en varios países y ciudades de la región Latinoamérica y el Caribe, y la cooperación nacional en Colombia CO-T1558 financiada con recursos del Fondo UK-SIP de la Embajada Británica para el transporte urbano sostenible en ciudades colombianas.

Agradecimientos por su contribución al desarrollo de la investigación y/o del presente documento

Lauren Montes, Especialista División de Transporte del Banco Interamericano de Desarrollo

Blanco y Negro Masivo, operador del MIO.

Dirección de Operaciones de Metro Cali S.A.

Ariel Núñez, Miguel Ibañez y Gianni López del Centro Mario Molina Chile.

Autores

Marcela Castillo, Investigadora Senior del Centro Mario Molina Chile.

Sebastián Galarza, Líder del Área de Energía y Transporte del Centro Mario Molina Chile.

Juanita Concha Rivera, Consultora División de Transporte del Banco Interamericano de Desarrollo.

Editores

Felipe García Aladín, Director de Operaciones de Metro Cali S.A.

Benoit Lefevre, PhD, Especialista Sectorial Senior - Cambio Climático y Desarrollo Sostenible del Banco Interamericano de Desarrollo.

Gibet Camós, Especialista Senior División de Transporte de Colombia del Banco Interamericano de Desarrollo.

Fanny Bertossi, Consultora División de Transporte de Colombia del Banco Interamericano de Desarrollo.

Contenido

Índice de figuras	06
Índice de tablas	06
Abreviaturas	07
Resumen ejecutivo	09
1. Contexto del SITM-Cali, Colombia	14
1.1. Transporte público en Colombia	15
1.2. Descripción del SITM-MIO	18
1.3. Descripción de flota eléctrica	21
2. Desafíos identificados	14
2.1. Desafíos sistémicos a la integración de buses eléctricos	26
2.1.1. Oferta de buses eléctricos	26
2.1.2. Normas y regulación	28
2.2. Desafíos operacionales a la integración de buses eléctricos: el caso de Cali	28
2.2.1. Infraestructura de carga	29
2.2.2. Planificación de operaciones, asignación y programación de flota	30
2.2.3. Mantenimiento y monitoreo de flota	31
2.2.4. Capacitación de personal	32
3. Propuestas para subsanar las brechas para masificación de buses eléctricos	33
3.1. Infraestructura de carga	34
3.1.1. Interoperabilidad	34
3.1.2. Estándares y protocolos de carga	34
3.1.3. Protocolos de comunicación	36
3.1.4. Infraestructura eléctrica en electroterminales	39
3.2. Planificación de operaciones, asignación y programación de flota	41
3.2.1. Modelación del consumo de energía del bus en cada ruta del sistema	43
3.2.2. Logística operacional	47
3.3. Mantenimiento y monitoreo de flota	47
3.4. Capacitación de personal	50
4. Referencias bibliográficas	54

Figuras

- Figura 1** Buses eléctricos en circulación (febrero 2020) en distintas ciudades de ALC.
- Figura 2** Cronograma de incorporación de buses eléctricos y de baja emisión.
- Figura 3** Rutas que operan en el sistema de transporte público de Cali.
- Figura 4** Infraestructura del SITM-MIO.
- Figura 5** Componentes del bus eléctrico.
- Figura 6** Dimensiones del bus eléctrico.
- Figura 7** Cargador de bus eléctrico.
- Figura 8** Marca y energético de los buses registrados en el RUNT entre los años 2016 a 2020.
- FIGURA 9** Conectores para vehículos eléctricos, por región y tipos de corriente.
- FIGURA 10** Protocolos de comunicación.
- Figura 11** Metodología para determinar la factibilidad eléctrica de electroterminales.
- Figura 12** Metodología para el diseño de un plan operacional.
- Figura 13** Procedimiento general de la metodología para la construcción de perfiles en Cali.
- Figura 14** Perfiles de velocidad y de altitud de una ruta en particular.
- Figura 15** Metodología general para la modelación

Tablas

- Tabla 1** Desafíos y recomendaciones para la masificación de la electromovilidad en el transporte público mayor de Cali.
- Tabla 2** Líneas de acción de la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica (ENME).
- Tabla 3** Vida útil de buses por tipología.
- Tabla 4** Especificaciones del tren motriz del bus eléctrico.
- Tabla 5** Identificación de factores clave de desempeño.
- Tabla 6** Parámetros de operación de buses eléctricos.
- Tabla 7** Desafíos y recomendaciones para la masificación de la electromovilidad en el transporte público mayor de Cali.

Abreviaturas

ALC	América Latina y el Caribe
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
BRT	Bus de tránsito rápido, bus rapid transit (BRT) en inglés
CA /AC	Corriente alterna
CAN Bus	Controller area network (CAN) bus
CC /DC	Corriente continua
CCS	Sistema de carga combinada (Combined charging system)
CMM	Centro Mario Molina Chile
CONPES	Consejo Nacional de Política Económica y Social
CPO	Operador de punto de carga (Charge point operator)
ENME	Estrategia nacional de movilidad eléctrica
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
KPI	Indicador Clave Desempeño (Key performance indicator)
MIO	Masivo Integrado de Occidente
OCA	Alianza de carga abierta (Open Charge Alliance)
OCPP	Protocolo de punto de carga abierto (Open Charge Point Protocol)
OSCP	Protocolo de carga abierto inteligente (Open Smart Charging Protocol)
RIC	Pliego técnico normativo
SAE	Sociedad de Ingenieros Automotrices (Society of Automotive Engineers)
SETP	Sistemas estratégicos de transporte
SITM	Sistema de Transporte Masivo
SIUR	Sistema de información unificado de respuesta
SOC	Estado de carga (State of charge)
SOH	Estado de salud (State of health)
UTRYT	Unión temporal de recaudo y tecnología
V2G	Vehículo a la red (Vehicle-to-grid)



Resumen ejecutivo

Desde el año 2000, Colombia ha impulsado la implementación de Sistemas de Transporte Masivo (SITM) en las principales ciudades del país, con el objetivo de mejorar las condiciones de servicio del transporte público. En el año 2008, se inauguró el SITM de Cali, conocido como Masivo Integrado de Occidente (MIO), con el fin de proveer una movilidad sostenible para la ciudad y reducir muchas de las externalidades negativas asociadas con las operaciones de transporte público, comenzando sus operaciones en el primer trimestre de 2009. Desde entonces, el sistema ha crecido hasta llegar a cubrir más del 70% de la demanda de transporte público no individual de la ciudad¹, a través de 94 rutas servidas por cuatro empresas concesionarias.

En años recientes, en el marco de la planeación del MIO, se identificó la necesidad de vincular a la flota inicialmente requerida (compuesta por 911 buses entre articulados, padrones y complementarios²), 377 vehículos adicionales de cero o bajas emisiones. Esta adición a la flota del sistema busca mejorar las condiciones de movilidad de los usuarios de su red e iniciar el ascenso tecnológico de su flota. En este sentido, a mediados de septiembre del año 2019 comenzó a circular por las calles de Santiago de Cali la primera flota de buses eléctricos de un SITM en Colombia. La llegada de esta flota se da a través de

un acuerdo de financiamiento entre un concesionario de la red, Blanco y Negro S.A., y la empresa Celsia S.A., que financió y dio apoyo técnico para la compra de 26 buses eléctricos complementarios y la instalación de 13 cargadores (120 kW).

Este hito se enmarca dentro de una tendencia, cada vez más establecida, de incorporar buses eléctricos a las operaciones de los sistemas de transporte público en América Latina y el Caribe (ALC). Siguiendo la línea marcada por ciudades en China y Europa, las urbes de ALC han reconocido el potencial que tienen los buses eléctricos para reducir los costos operativos del transporte, los niveles de ruido, la contaminación local –incluyendo los beneficios para la salud y las emisiones de gases de efecto invernadero–, aumentar la confiabilidad y la calidad del servicio del transporte público, y desarrollar un mercado laboral basado en energías limpias.

Es con estos objetivos en mente que, desde que comenzaron a operar los primeros 26 buses eléctricos en el MIO de Cali, se han sumado 69 unidades en Medellín, y Bogotá ha licitado 1.485 unidades que entrarán en operación de manera paulatina hasta el segundo semestre del 2022³, siendo esta última la mayor licitación de buses eléctricos en las Américas y una de las mayores a nivel internacional.

¹ Encuesta de Movilidad de Cali, 2015

² Capacidad promedio por tipología vehicular: articulados de 160 pasajeros, padrones de 80 pasajeros y complementarios de 48 pasajeros.

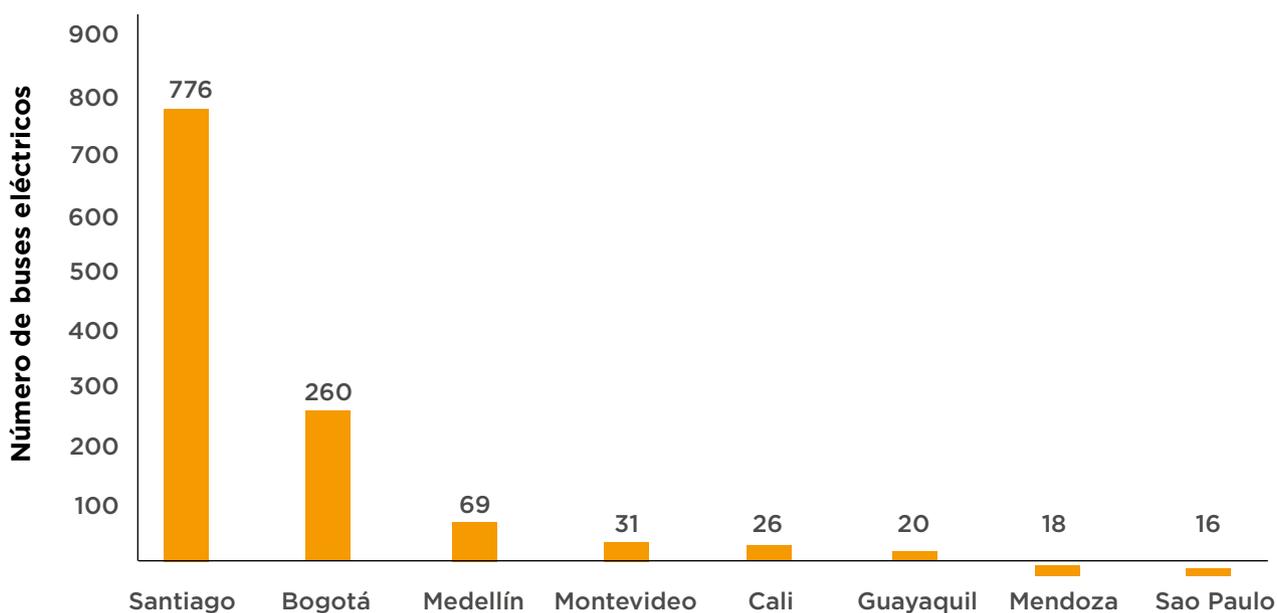
³ Semana (2021) “Bogotá tendrá la mayor flota de buses eléctricos de América”. Semana. 3 de febrero de 2021. Web. Disponible en: <https://www-semana-com.cdn.ampproject.org/c/s/www.semana.com/amp/economia/empresas/articulo/bogota-tendra-la-mayor-flota-de-buses-electricos-de-america/202116/>

A la fecha, existen más de 1.300 buses eléctricos en operación en 17 ciudades de ALC⁴ y en los próximos años veremos este número multiplicarse a medida que

más ciudades concretan sus planes de transición energética, con vistas a cumplir sus compromisos climáticos y reducir sus índices de contaminación atmosférica.

Figura 1

Buses eléctricos en circulación (febrero 2020) en distintas ciudades de ALC



Fuente: E-Bus Radar, 2020

La experiencia de los operadores de transporte público con buses eléctricos ha sido en general exitosa. Tanto los operadores como los usuarios de transporte público han podido ver los beneficios de un transporte que elimina las emisiones contaminantes (como el material particulado fino y óxidos de nitrógeno) y acústicas asociadas con los buses a diésel o gas natural. A su vez, la renovación de flota ha sido acompañada con mayores niveles de confort y accesibilidad en los buses, en muchos casos incluyendo por

primera vez aire acondicionado o enchufes USB para la carga de celulares u otros aparatos. Asimismo, los buses eléctricos han demostrado ser competitivos al tener consumos de energía por kilómetro recorrido muy inferiores a los vistos con buses de combustión interna, lo que se traduce en un ahorro operacional importante para el operador del bus. A esto se suma la reducción en los costos de mantenimiento asociado al tren motriz simplificado de un bus eléctrico, entre otros componentes, que han mostrado ser

⁴ LABMOB (2020) "E-bus Radar" Disponible en: <https://www.ebusradar.org/>

hasta un 70% inferiores a los de buses de combustión interna⁵.

Sin embargo, existen retos operacionales importantes para lograr la masificación de los buses eléctricos en operaciones de transporte público, como también en el manejo de la infraestructura de carga, al identificarlos y evaluarlos se podrá sacar el mayor provecho a esta tecnología.

Por otro lado, como suele suceder en otros ámbitos, la tecnología va más rápido que las normativas y las políticas públicas. Si bien existe la voluntad política, muchas veces esta no llega a tiempo para normar aspectos que pueden tener impactos importantes en las operaciones de flotas de buses eléctricos, como es el caso de la normalización de protocolos de carga o la homologación de buses eléctricos.

A estos retos operacionales se suman los económicos, donde los mayores costos de capital de los buses eléctricos necesitan modelos innovadores de financiamiento para ser viables y los retos fiscales, donde el recambio tecnológico no pueda poner en jaque la sostenibilidad financiera de los sistemas de transporte público, en particular bajo el contexto de pandemia que ha afectado severamente las tasas de ocupación y la recaudación de estos mismos.

Estas condiciones llaman la atención sobre la importancia de generar herramientas

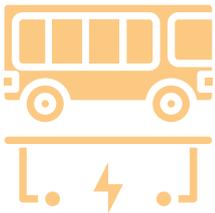
que acompañen a los entes gestores y autoridades de transporte en el ascenso tecnológico y sirvan de guía a partir de experiencias aprendidas.

El presente documento se enmarca en la puesta en marcha y escalamiento de una operación de transporte público con buses eléctricos. Por ello, no abarca temas relacionados con la factibilidad económica, financiera o sostenibilidad fiscal relacionadas a la operación de transporte público con buses eléctricos. Para determinar la factibilidad operacional de la puesta en marcha de operaciones de buses eléctricos, y mejorar y optimizar su desempeño, se analizaron las principales medidas implementadas por autoridades y concesionarios, y se desarrollaron escenarios de crecimiento de demanda energética, implementación de infraestructura de carga eléctrica y un plan de servicio, operación y asignación de flota de buses eléctricos. En paralelo, se realizaron una serie de capacitaciones con personal del MIO y concesionarios para transferir conocimiento sobre las mejores prácticas en la puesta en marcha de operaciones de transporte público con buses eléctricos.

Los principales hallazgos y lecciones aprendidas alimentan el presente documento que pretende servir de guía para autoridades de transporte público y operadores en la introducción de buses eléctricos.

⁵ Ministerio de Energía de Chile (2020). Web. "Plataforma de Electromovilidad". Disponible en: <https://energia.gob.cl/electromovilidad/transporte-de-pasajeros/buses-electricos-red>

Principales objetivos



- i. Resaltar las lecciones aprendidas sobre el despliegue y operación de buses eléctricos y su infraestructura de carga basados en la experiencia del MIO.



- ii. Guiar a tomadores de decisión en organizaciones de transporte público (regulador y operador) sobre los aspectos operacionales a tomar en cuenta en el momento de comprar, integrar y operar una flota de buses eléctricos.

Para cumplir con estos objetivos, el documento describe un diagnóstico de los principales desafíos encontrados junto con una propuesta con recomendaciones (Tabla 1) para el despliegue de buses eléctricos en Cali.

El diagnóstico e identificación de los factores claves que podrían impactar en el escalamiento de la electromovilidad en el transporte público es uno de los principales pasos que debe realizar la autoridad para asegurar el éxito de sus operaciones. En el presente documento, se resaltan y analizan varias de las brechas, desde la perspectiva técnica de la electrificación, identificadas en los procesos de electrificación de flota del MIO en Cali con miras a la masificación de la electrificación en el transporte público. Entre estas se encuentran los desafíos relacionados con instalar y operar la infraestructura de carga para los buses eléctricos, la programación de la operación de una flota mixta – eléctrica y convencional–, los desafíos de

mantenimiento de buses eléctricos por parte de concesionarios y fabricantes y, finalmente, los desafíos en cuanto a capacitación de personal.

Este reporte presenta cómo se han ido resolviendo y diagnosticando los retos operacionales que las autoridades y concesionarios de transporte público han debido enfrentar a la hora de incorporar buses eléctricos. En este proceso, destacamos el apoyo para determinar las rutas con mayor potencial de electrificación y el desarrollo de un programa de operación para estos servicios, así como la serie de capacitaciones realizadas para cubrir la brecha de conocimiento tecnológico y resolver algunas problemáticas asociadas con el correcto mantenimiento de las estaciones de carga. Asimismo, presentamos el diagnóstico preliminar sobre el potencial de electrificación que tiene el SITM Cali con respecto a su capacidad instalada y consumo de energía. Estos procesos pueden servir de guía para

operadores embarcados en procesos similares y para resolver o prevenir posibles retos en la integración de buses eléctricos a sistemas de transporte público con tecnologías mixtas (diésel y eléctrico). Esto, con el fin de acelerar el despliegue

de la electromovilidad en los sistemas de transporte masivo de la región, como punto de entrada para la transformación del sector automotriz de América Latina y el Caribe en uno basado en energías limpias y menos contaminantes.

Tabla 1

Desafíos y recomendaciones para la masificación de la electromovilidad en el transporte público mayor de Cali

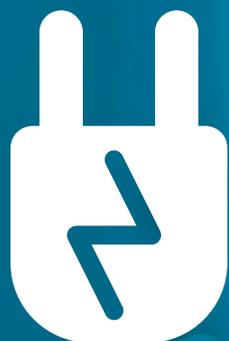
Desafíos		Recomendaciones
Infraestructura de carga	Estándares y protocolos de carga	Estandarizar el tipo de conector.
	Protocolos de comunicación	Solicitar un protocolo de comunicación abierto.
	Infraestructura eléctrica en terminales	Estimar la potencia y energía requerida por patio.
Tener suficiente potencia instalada en la red eléctrica para la incorporación de la electromovilidad.		
Planificación de la operación	Consumo de energía en las rutas	Tener información de pilotos de buses eléctricos disponible ⁶ .
		Tener información operacional para realizar modelaciones del consumo de energía para cada ruta.
	Logística operacional	Determinar, por parte del ente gestor y/o operador, las rutas con mayor potencial de ser electrificadas.
		Averiguar si el software que se utiliza en la planificación permite ingresar buses con tecnología eléctrica (autonomía).
Mantenimiento y monitoreo		Solicitar el monitoreo de la batería.
		Desarrollar un plan de monitoreo de la flota y cargadores.
		Desarrollar un plan de seguimiento con principales KPI de la operación.
Capacitaciones	Operadores	Elaborar un programa de entrenamientos para conducir vehículos eléctricos.
		Elaborar un programa de entrenamiento a los encargados de soporte, mantención y carga de buses.
	Universidades/ Institutos técnicos	Incorporar en el sistema de educación, carreras o materias afines a la electromovilidad.

Fuente: Elaboración propia

⁶ Si existieran pilotos de buses eléctricos

1.

Contexto del SITM- Cali, Colombia



1.1.

Transporte público en Colombia

Con la puesta en operación de TransMilenio, Colombia inició en el año 2000 la implementación de Sistemas de Transporte Masivo (SITM) y Sistemas Estratégicos de Transporte (SETP), a la que se sumó, en el año 2009, la operación del SITM de Cali, denominado MIO. A la fecha, el país cuenta con siete SITM operando en las principales ciudades y ocho SETP en proceso de implementación en ciudades intermedias. El principal objetivo de la implementación de estos sistemas es mejorar las condiciones de servicio del transporte público de pasajeros y el tránsito en general, contribuyendo a estructurar ciudades sostenibles y competitivas que permitan a los ciudadanos tener oportunidades seguras de movilidad bajo principios de eficiencia, equidad y protección medioambiental.

No obstante, el avance en la implementación de medidas enfocadas al mejoramiento en la prestación del servicio

público de transporte, las externalidades negativas generadas por el sector siguen siendo un desafío para el gobierno por el impacto negativo de las emisiones de motores a combustión interna en la salud y sus contribuciones al cambio climático. El sector del transporte en Colombia es el mayor consumidor de energía (40,8%), seguido de la industria (24,1%), residencial (19,1%), agricultura, construcción minera (5,4%) y terciario (10,4%)⁷. La gasolina y el diésel representan el 77% de las fuentes de energía utilizadas por el transporte, sector que representa el 78% de las emisiones de CO₂ y el 11% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI).

Bajo este contexto, el gobierno de Colombia identificó la renovación de la flota como una prioridad y ha avanzado en la expedición de instrumentos de política pública que impulsan la implementación de flota eléctrica en la operación del transporte urbano:



CONPES 3943 de 2018, Política para el Mejoramiento de la Calidad del Aire: establece dentro de sus objetivos “la reducción de las emisiones contaminantes al aire provenientes de fuentes móviles, y en este sentido incluye acciones para la desintegración y el desincentivo en el uso de vehículos altamente contaminantes y el reemplazo de los mismos por tecnologías de cero y bajas emisiones.



Ley 1955 de 2019 - Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022, en particular el artículo 100: presenta la oportunidad para que el gobierno pueda cofinanciar la adquisición de nuevas flotas de bajas y cero emisiones para los SITM y los SETP.

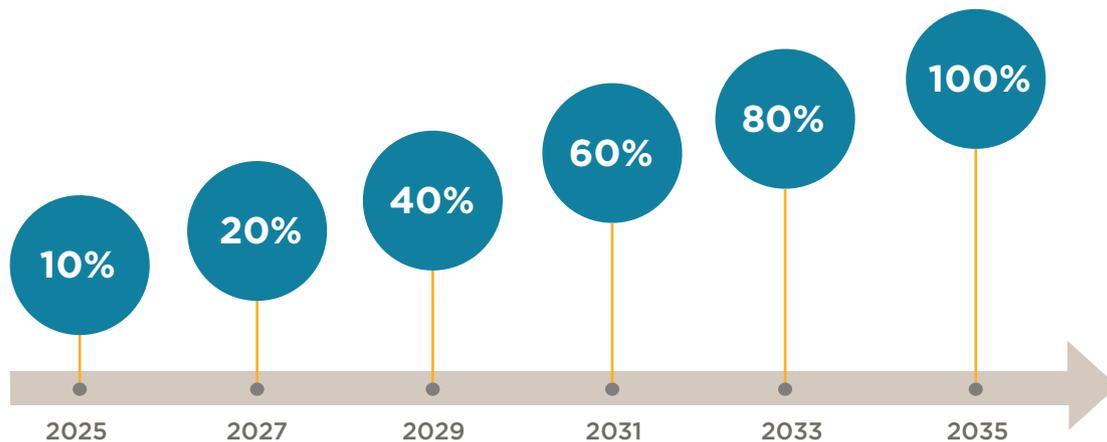
⁷ UPME (2020). “Plan energético nacional 2020 2050”. Disponible en https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_2020_2050/Plan_Energetico_Nacional_2020_2050.pdf



La Ley 1964 del 11 de julio de 2019: Ley de Movilidad Eléctrica cuyo objeto es generar esquemas de promoción al uso de vehículos eléctricos y de cero emisiones, con el fin de contribuir a la movilidad sostenible y a la reducción de emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero. Incluyó políticas para la implementación de incentivos económicos y de uso para impulsar la electrificación del sector transporte. Así mismo, estableció el porcentaje mínimo de vehículos eléctricos o de bajas emisiones –respecto de la flota de operación– que deberán cumplir las ciudades que cuenten con SITM cuando se pretenda aumentar la capacidad transportadora de los sistemas o cuando se requiera reemplazar un vehículo por destrucción total o parcial. Esta exigencia se plantea de forma gradual, iniciando con un mínimo de 10% para el año 2025 y llegando al 100% en el año 2035, cumpliendo con el siguiente cronograma:

Figura 2

Cronograma de incorporación de buses eléctricos y de baja emisión a los Sistemas de Transporte Masivo (SITM)



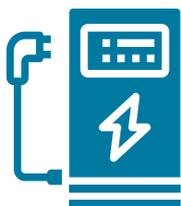
% mínimo de vehículos eléctricos respecto al total de vehículos adquiridos

fuentes: Elaboración propia con información de la ley 1964 de 2019



La Ley 1972 de 2019, en particular art. 9: plantea para los sistemas de transporte organizados y estructurados del país⁸, la meta de contar como mínimo con el 20% de la flota total nueva correspondiente a tecnología cero emisiones.

⁸Incluye los Sistemas Integrados de Transporte Masivo (SITM), los Sistemas Estratégicos Transporte Público (SETP), los Sistemas Integrados de Transporte Público (SITP) y los Sistemas Integrados de Transporte Regional (SITR).



La Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica (ENME): tiene como objetivo definir las acciones que permitan acelerar la transición hacia la movilidad eléctrica y plantea acciones para el desarrollo de los lineamientos técnicos necesarios para la promoción de tecnologías eléctricas en los diferentes segmentos y modos de transporte.

Para el cumplimiento de las metas planteadas por la Ley de Movilidad Eléctrica, la ENME ha evidenciado la necesidad de generar políticas y marcos normativos, incluyendo para estos últimos temas como **i)** la importación, producción y operación de otro tipo de tecnologías vehiculares,

ii) la construcción de la infraestructura de carga, **iii)** los esquemas tarifarios y **iv)** los criterios técnicos necesarios para la operación.

Con el objetivo de cerrar estas brechas, la ENME plantea las siguientes acciones:

Tabla 2

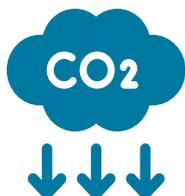
Líneas de acción de la Estrategia Nacional de movilidad eléctrica (ENME)

Líneas de acción	Descripción
Eficiencia energética	Definir estándares mínimos de eficiencia energética para tecnologías vehiculares, lo cual deberá ir acompañado por una etiqueta de eficiencia vehicular.
Restricción a la circulación de vehículos en función de sus emisiones contaminantes	Generar medidas que desincentiven el uso de vehículos contaminantes en áreas o tiempos específicos.
Esquema tarifario de energía	Reglamentar los aspectos necesarios sobre regulación en la tarifa de energía eléctrica e infraestructura para carga de vehículos, analizando su interacción con la red vehicle to grid.
Penetración de tecnologías eléctricas	Formular el programa de reemplazo de la flota oficial a vehículos eléctricos. Igualmente, deberán formular un programa de incorporación de vehículos eléctricos en flotas de uso intensivo como transporte público y taxis, así como aquellas otras clases y modalidades que se estimen convenientes.
Ordenamiento territorial	Considerar medidas de ordenamiento territorial y planificación de infraestructura de carga en espacios públicos y privados.
Mesa de tecnologías vehiculares de cero y bajas emisiones	Fortalecer la mesa de tecnologías vehiculares de cero y bajas emisiones.

Fuente: Elaboración propia con información de la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica de Colombia 2019

Considerando los resultados esperados de la promoción de la movilidad eléctrica en Colombia, así como otras acciones del sector transporte y de los demás sectores de la economía, el Gobierno de Colombia

realizó la actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC por sus siglas en inglés) en el año 2020, comprometiéndose a:



Emitir como máximo 169.44 millones de tCO₂eq en 2030 (equivalente a una reducción del 51% de las emisiones respecto a la proyección de emisiones en 2030 en el escenario de referencia), iniciando un decrecimiento en las emisiones entre 2027 y 2030 tendiente hacia la carbono-neutralidad a mediados de siglo.



Establecer presupuestos de carbono para el periodo 2020-2030 a más tardar en 2023.



Reducir las emisiones de carbono negro del 40% respecto al nivel de 2014.

1.2.

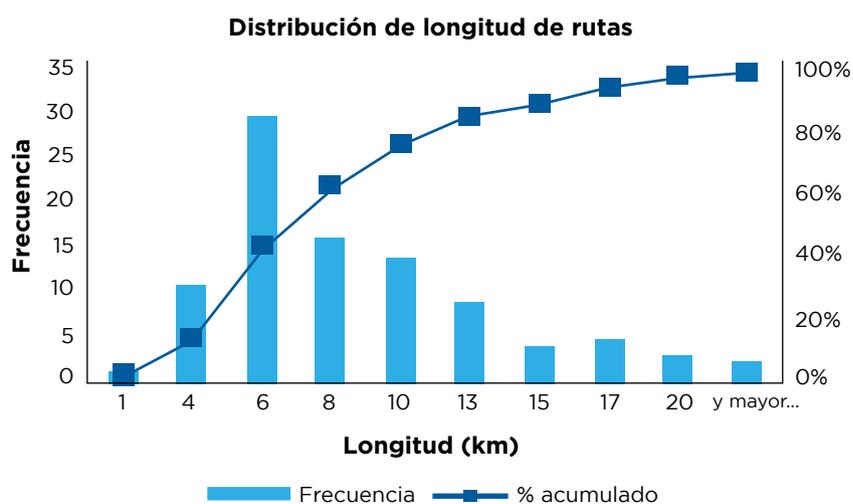
Descripción del SITM-MIO

En el año 2009 inició la operación comercial del SITM-MIO en Cali. En la actualidad, la oferta de buses tiene una cobertura espacial aproximada del 93% de la zona de Cali, cuya operación actual está compuesta de 94 rutas entre troncales (circulan por corredores BRT parando en todas las estaciones), expresas

(circulan por corredores BRT parando en estaciones de mayor demanda), pre-troncales (circulan por carril de tráfico mixto de vías principales y secundarias) y alimentadoras (por carril de tráfico mixto en vías secundarias y barriales). Cerca de un 45% de las rutas tienen longitudes menores a 5 km y un 90% menos de 15 km, por sentido de viaje. En términos de horario de operación, la primera posición de buses es a las 4:00 am y la última salida a medianoche.

Figura 3Rutas que operan en el Sistema de Transporte Público de Cali⁹

Día tipo	Nº de tareas	Nº de rutas	Nº de viajes comerciales
Día hábil	1127	96	18440
Sábado	667	91	15509
Domingo	407	78	11186



Fuente: Metro Cali S.A.

En el sistema de transporte público de Cali son permitidas tres tipologías de buses (Tabla 3). Al momento del desarrollo del

presente reporte, solo buses eléctricos de tipo complementario estaban operando en la ciudad.

Tabla 3Vida útil de buses por tipología¹⁰

Tipología	Vida útil			
	Edad (años)		Kilómetros Recorridos (millones de km)	
	Máximo permitido	Edad a Feb/2019	Máximo permitido	Recorridos Feb/2019
Complementario (9m)	15	7,5	1	0,528
Padrón (12m)	17	7,6	1,1	0,495
Articulado (18m)	20	7,8	1,4	0,501

Fuente: Elaboración propia con datos provistos por Metro Cali S.A.

⁹ Metro Cali (2019). "Reporte Definitivo Plan 190820".¹⁰ Metro Cali (2019). "Reunión MIO-CMM".

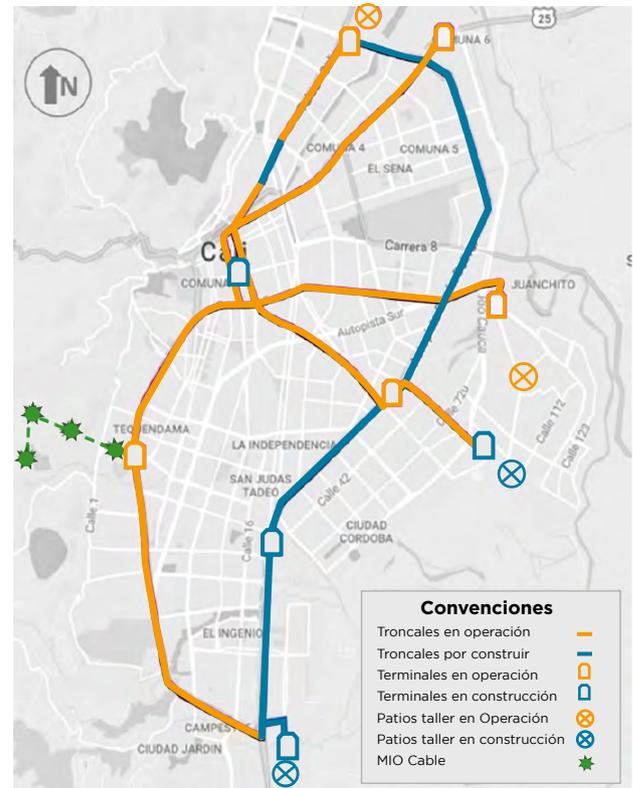
Esta oferta se presta actualmente con los siguientes agentes:

- Metro Cali S.A. es la entidad pública gestora del sistema.
- Cuatro concesiones de operación de transporte adjudicadas a: GIT Masivo S.A., Blanco y Negro Masivo S.A., ETM S.A. y Unimetro S.A.
- Se cuenta con un contrato de concesión adjudicado a la Unión Temporal de Recaudo y Tecnología (UTRYT), encargada de ejercer las labores de diseño, implementación, integración, financiación, puesta en marcha, operación y mantenimiento del Sistema de Información Unificado de Respuesta (SIUR), dentro del cual se encuentran el subsistema de planeación, gestión y control de flota, así como el subsistema de recaudo, entre otros.

El SITM-MIO cuenta con la siguiente infraestructura para la gestión de flota y para la prestación del servicio:

- Para la gestión de mantenimiento y estacionamiento, actualmente se encuentran en operación tres patios taller completos y un patio-taller provisional, que será reemplazado por otro patio taller que se encuentra en proceso de construcción.
- Para la prestación del servicio, el SITM-MIO cuenta con 34 km de corredores troncales, 55 estaciones, cinco terminales en operación y tres terminales en proceso de construcción.

Figura 4
Infraestructura del SITM-MIO



Fuente: Elaboración propia

En el marco de la planeación del SITM-MIO, Metro Cali S.A. identificó la necesidad de vincular 377 vehículos de cero o bajas emisiones al sistema para mejorar las condiciones de movilidad de los usuarios e iniciar el ascenso tecnológico de la flota, teniendo en cuenta que el estándar de emisiones de la flota incluye buses Euro II, III, IV y V (la norma vigente es Euro IV desde el 2013). En este orden de ideas, en 2019 y 2020 se vincularon al MIO un total de 26 vehículos eléctricos.

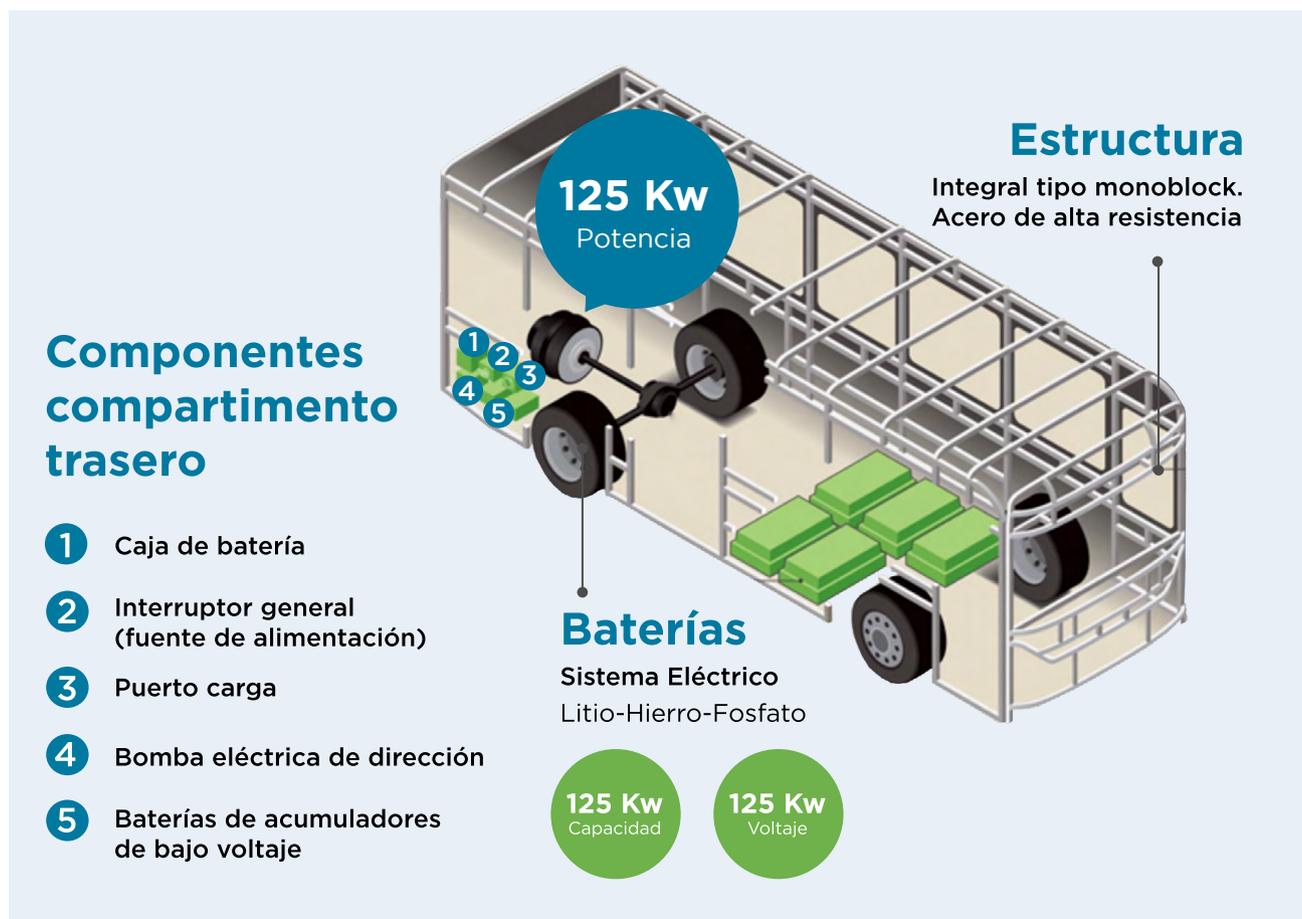
Esta situación ha planteado retos importantes desde la planificación y construcción de la infraestructura eléctrica requerida para cargar los buses y la programación de operación de los vehículos, teniendo en cuenta variables como la autonomía de los buses, el tiempo de carga y las buenas prácticas del manejo de la carga para preservar la vida útil de la batería, la identificación de rutas con mejor rendimiento de carga para los buses eléctricos, la capacitación a los conductores en la conducción eficiente (conducción verde), la capacitación al personal de mantenimiento en vehículos eléctricos, entre otros.

1.3. Descripción de flota eléctrica

A diciembre del 2020, las unidades de buses eléctricos que se vincularon al sistema son de tipo complementario, operan en rutas alimentadoras y pre-troncales (ver dimensiones en Figura 6) y son operadas por el concesionario Blanco y Negro Masivo SA.

Figura 5

Componentes del bus eléctrico



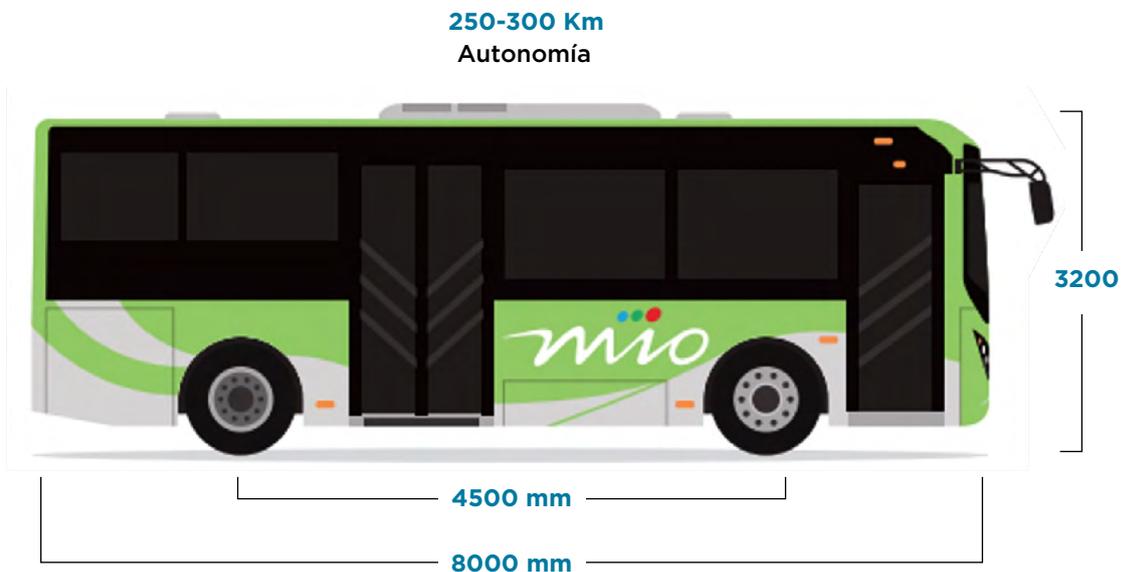
fuentes: Elaboración propia

Los buses eléctricos que se incorporaron al MIO fueron importados con una estructura integral de tipo monoblock con acero de alta resistencia, desde China, con un peso bruto vehicular de 12.900 kg. Cuentan con paquetes de baterías de litio-ferro-fosfato con una capacidad de almacenaje de 221 kWh (que puede ser extendida hasta 268 kWh). Por parte del fabricante, se estima para estas baterías una autonomía entre 250 y 300 km por carga, contando también con frenado regenerativo para extender la

autonomía de la operación. El motor de estas unidades cuenta con una potencia de 125 kW y puede circular en rutas con una pendiente máxima de 16%. Los buses tienen una capacidad para 60 pasajeros (22 sentados), cuentan con entrada con un escalón y un servicio de elevador para silla de ruedas, aire acondicionado y puertos USB, entre otras amenidades. La siguiente tabla resume las principales características de estos buses.

Figura 6

Dimensiones del bus eléctrico



fuentes: Elaboración propia

Tabla 4

Especificaciones del tren motriz del bus eléctrico

Tren Motriz	
Especificación	Característica
Velocidad máxima	69 km/h
Radio de giro	1000 mm
Motor	Siemens DB 2010 permanent magnet synchronous
	Potencia 125 kW
	Torque 1050 Nm (2600 Nm) @3500 rpm
	IP67
Modo de Carga	Máx. pendiente: 16%
	Lenta: 3-5 horas
	Autonomía: 250-300 km
Sistema de baterías de tracción	Cargador 60 kW
	Litio-ferrofosfato
	Capacidad 221 kWh (opcional 268 kWh)
	Voltaje: 528 V
Baterías de sistemas auxiliares	IP67
	Dos baterías 150 Ah
PBV	Baja 24 V
Frenos	12.900 kg
	Frenos de disco en todas las ruedas con sensor de desgaste en eje delantero
	Sistema antibloqueo ABS y WABCO
	Retardador con freno regenerativo

Fuente: Elaboración propia con información suministrada por Blanco y Negro Masivo

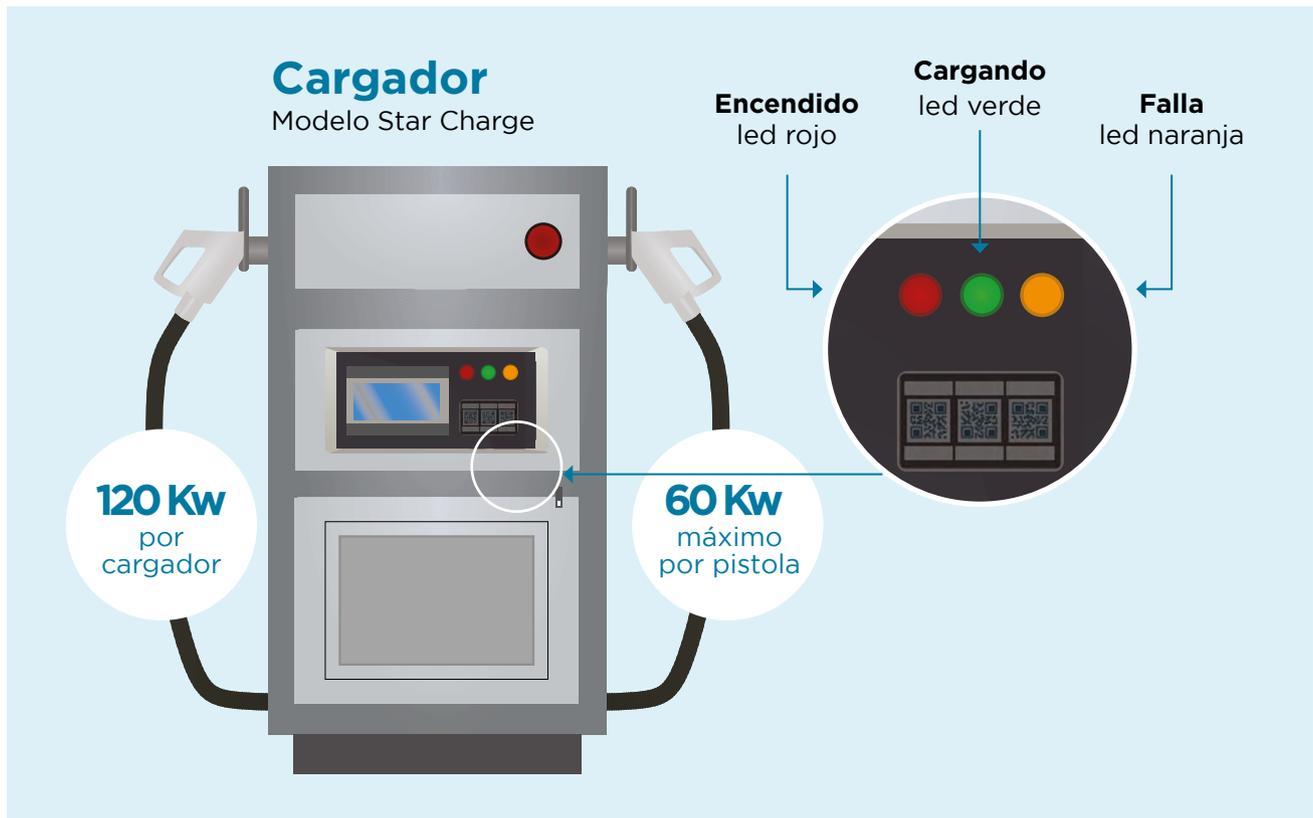
El patio desde donde operan los buses eléctricos está ubicado en el municipio de Yumbo, al norte de la ciudad de Cali. En términos de infraestructura eléctrica, en el patio se instaló una subestación eléctrica con una capacidad de 2 MW. Con dicha

potencia es posible la operación de 13 cargadores, los cuales poseen una potencia máxima de 120 kW con dos conectores, con protocolo de comunicación OCPP¹¹ 1.6, compatible con OCPP 1.5 y con protección IP54.

¹¹ Open Charge Point Protocol: el OCPP es un protocolo de comunicación abierto que funciona como intermediario entre las estaciones de carga y el sistema de administración de la red. Al ser un protocolo abierto, facilita la interoperabilidad, quitando la necesidad de utilizar protocolos propietarios. Actualmente se encuentra en su versión 2.0.1 (lanzada en abril de 2018).

Figura 7

Cargador de bus eléctrico



fuente: Elaboración propia

Con relación a la estrategia de recarga, esta tarda 2,5 horas en llegar al 100% de capacidad con un cargador de 120 kW de potencia con dos pistolas. En términos de autonomías y recarga, los operadores han indicado que un bus circula en promedio 190-200 km/día (140 km comerciales¹²)

con una carga nocturna más otra a medio día. Además, mencionaron que los buses han sido operados en distintas rutas del sistema, desarrollando, en algunos casos, una planificación de flota para que el bus operara de manera más eficiente circulando en varias rutas durante un mismo día.

¹² Según los documentos facilitados por Metro Cali, los buses de tipología complementario recorren en promedio un 13% de kilómetros en vacío.

2.

Desafíos identificados



2.2. Desafíos sistémicos a la integración de buses eléctricos

Durante el 2019 y 2020, el MIO tenía planificado incorporar 153 buses nuevos, aspirando a que al menos 129 fueran eléctricos. Esto se suma a las metas de electrificación de flota planteadas por el gobierno y resaltadas en la sección previa. Sin embargo, por distintos motivos, entre los cuales sin duda jugó un rol el confinamiento a causa de la pandemia de COVID-19, de esta meta solo se concretaron 26 unidades de marca SUNWIN en el año 2019. La llegada de la primera flota de buses eléctricos al MIO planteó desafíos importantes para la planificación y operación de los vehículos, teniendo en cuenta variables como la autonomía de los buses, el tiempo de carga, la identificación de rutas donde los buses eléctricos presentan las mejores prestaciones, entre otros. Antes de entrar en detalle en los desafíos operacionales, cabe resaltar que a estos se suman otros retos que muchas veces caracterizan la inserción o despliegue de nuevas tecnologías en sectores tradicionales – como el transporte público–, que serán repasados en los próximos párrafos. Entre estos, se denotan la madurez del mercado y oferta de buses eléctricos, el contexto normativo que facilite la puesta en marcha de la tecnología y, finalmente, aspectos de financiamiento asociados al mayor costo de capital de estos activos.

2.1.1. Oferta de buses eléctricos¹³

A pesar de que el número de buses eléctricos a nivel regional ha aumentado de manera significativa en los últimos años, el rubro sigue marcado por una limitada oferta de fabricantes de buses urbanos muchas veces nuevos a los mercados de la región. Salvo un par de excepciones, la oferta de buses eléctricos ha estado dominada por marcas automotrices chinas, con amplia experiencia en el mercado chino pero muchas veces limitada en ciudades de ALC. Actualmente, la marca BYD lidera las ventas a nivel regional, con más de 882 buses actualmente operando en la región y más de 1.000 unidades adicionales ya vendidas. A esta marca se suman Yutong (332) y Foton (215) como los siguientes fabricantes con más buses en circulación a nivel regional. Estas dos últimas marcas tienen amplia experiencia en el mercado de buses convencionales (diésel en particular) en los mercados de la región y muchas veces han llegado de la mano de empresas importadoras de renombre en los respectivos países. Finalizando la lista de fabricantes chinos de buses eléctricos, nos encontramos con King Long (26), Sunwin (26) y Zhongtong (12), con un número menor de buses eléctricos actualmente en operación.

Lo que resalta esta estructura de mercado es la falta de presencia de marcas norteamericanas y europeas, que han dominado muchos de los mercados de buses urbanos a diésel en la región. Volvo, Scania o Mercedes Benz han estado ausentes de estos procesos de electrificación de buses urbanos a pesar de su larga experiencia

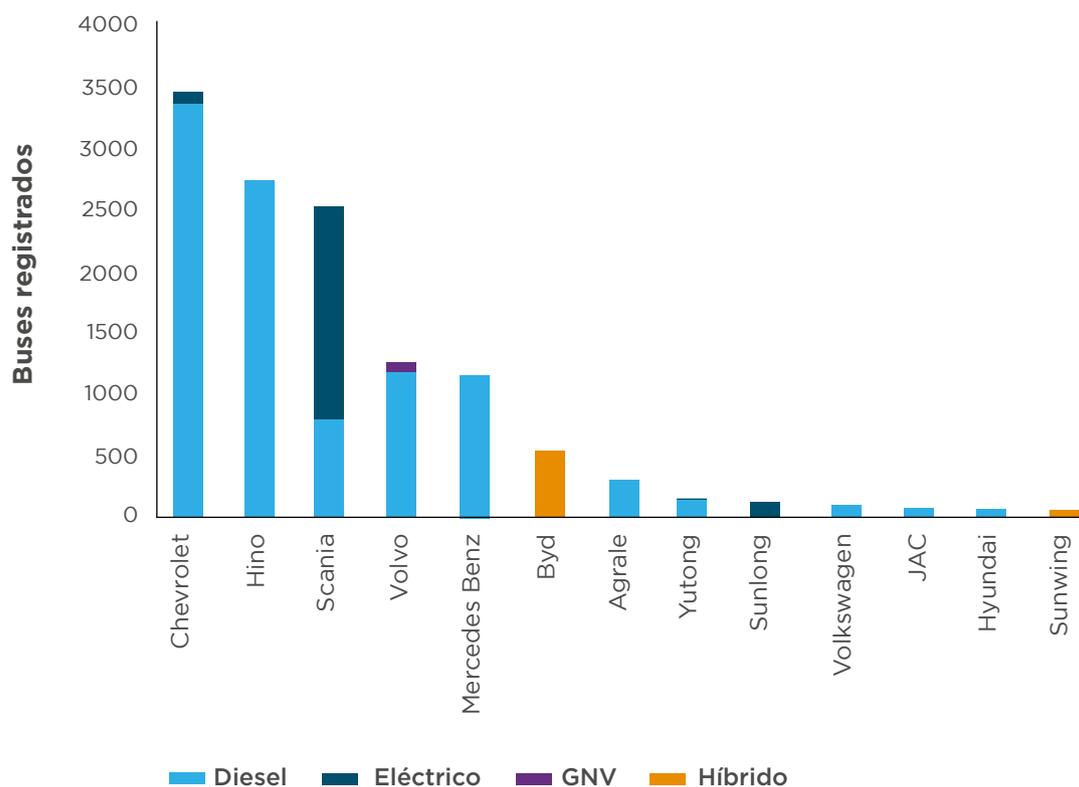
¹³ Los números de buses eléctricos reportados en esta sección fueron obtenidos de E-Bus Radar el 8 de febrero de 2021.

en la región. En la siguiente grafica se presenta como sido, la evolución de registros de buses en los últimos cinco (5) en Colombia, evidenciando que las dos

marcas que con mayor participación en el mercado de vehículos eléctricos han sido BYD y Sunwin, con las flotas vinculadas en Bogotá y Cali:

Figuro 8

Marca y energético de los buses registrados en el RUNT¹⁴ entre los años 2016 a 2020



fuelle: Elaboración propia con datos del RUNT

Independientemente de su origen, la llegada de buses eléctricos a los mercados de ALC también conlleva múltiples retos asociados con esta nueva tecnología. Existe incertidumbre sobre la autonomía reportada por fabricantes y la autonomía bajo operaciones reales, dada la falta

de armonización de los protocolos de medición de consumo de energía en el segmento de buses urbanos. Tanto así, que en el caso de Santiago de Chile se desarrolló un protocolo de pruebas de consumo de energía para las licitaciones de buses en la ciudad¹⁵. A esto se suma la falta de

¹⁴ Registro Único Nacional de Transito de Colombia

¹⁵ Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (2018). Resolución Exenta 2243. Aprueba Protocolo Técnico para Obtener Consumo Energético en Buses de Transporte Público Urbano de la Ciudad de Santiago. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1121384>

claridad de los costos de mantenimiento y servicio posventa dado que en muchos casos estos servicios son tercerizados tanto por las empresas importadoras como por los mismos operadores. Finalmente, y relacionado con este último punto, existe incertidumbre con respecto al deterioro de las baterías de los buses y las garantías asociadas a las mismas.

2.1.2.

Normas y regulación

Al igual como sucede con otros desarrollos tecnológicos, la llegada de la electromovilidad suele darse más rápidamente que el desarrollo del marco normativo y regulatorio para acompañarla. En el caso de Colombia, si bien el país ha logrado ratificar proyectos de ley que incentivan y ponen metas para la electrificación del transporte público, todavía restan varios aspectos regulatorios que tienen que ser resueltos. En el caso de la llegada de buses eléctricos, todavía es necesario adaptar los procesos de importación, nacionalización (salida de aduana para comercialización en el país) y homologación para asegurar que estos vehículos puedan circular dentro del territorio nacional bajo las mismas garantías que otros buses de uso urbano. A la fecha, varias de las partidas de importación para buses eléctricos todavía no han sido modificadas (e.g. declaración de contaminantes para buses eléctricos que no tienen emisiones de contaminantes locales) lo cual puede atrasar o dificultar los procesos de importación. A su vez, si bien el país está abordando los mismos requerimientos para los cargadores de alta potencia usados en los buses eléctricos, todavía existen brechas para definir la interoperabilidad de la infraestructura de carga para operaciones de buses eléctricos. En relación con este punto,

existe todavía a nivel regional (ALC) una falta de armonización con los requisitos que deben cumplir los sistemas de carga para vehículos eléctricos. En el caso particular de los buses, asegurar la interoperabilidad y comunicación entre distintos cargadores y vehículos a través de la adopción de estándares y protocolos compatibles es de suma importancia para no poner en jaque la flexibilidad operacional de flotas de transporte público. A estos se deben agregar todos los protocolos de seguridad asociados con operaciones eléctricas de alta potencia, incluyendo los necesarios para el caso de accidentes. Igualmente, todavía no se opta por protocolos específicos que cubran las obras civiles para la construcción de electroterminales y la instalación de cargadores de alta potencia.

2.2.

Desafíos operacionales a la integración de buses eléctricos: el caso de Cali

Si bien muchos de los desafíos resaltados en la sección anterior tienen que ver con condiciones de mercado que van más allá del ámbito de influencia de un operador de transporte público, el objetivo de este informe es resaltar los principales desafíos de la integración de flotas de buses eléctricos a operaciones de transporte público, así como sus soluciones.

Como ya hemos resaltado previamente, la primera flota de buses eléctricos del MIO planteó desafíos importantes con respecto a la planificación y operación de los buses –en particular con relación a su autonomía,

tiempos de carga, la identificación de rutas donde los buses eléctricos presentan las mejores prestaciones y las capacidades del personal y servicios contratados para poder resolver estos retos-. Para identificar los principales desafíos para continuar con la integración masiva de buses eléctricos al SITM de Cali, primero se validó una serie de factores clave para el desempeño de su operación junto con el MIO. Entre estos destacan el rol de los concesionarios como

operadores de flota, la tipología de buses e infraestructura de carga asociada, así como el soporte técnico y los recursos humanos necesarios para cumplir con los requerimientos operacionales del SITM. Una vez validada la lista, se consultó a los actores involucrados respecto de la visión que tienen del sistema (coordinación, flujos de información, tiempos, entre otros) y los principales desafíos planteados por la primera operación con buses eléctricos.

Tabla 5

Identificación de factores clave de desempeño

Factores	Descripción
Concesionario	Operadores privados de la flota eléctrica
Buses/marca	Tipo de bus que ingresará al sistema Desarrollo de especificaciones técnicas
Infraestructura eléctrica	Estándares y protocolos de carga Interoperabilidad de buses Instalación de cargadores Carga energética del sistema
Soporte técnico	Capacitación dentro del privado Centros de formación técnica
Recursos humanos	Capacitación dentro del sector público y privado

Fuente: Elaboración propia

Los principales desafíos identificados durante el diagnóstico de brechas de las operaciones de buses eléctricos en Cali se resumen dentro de las categorías presentadas a continuación.

2.2.1.

Infraestructura de carga

La entrada en operación de la primera flota de buses eléctricos puso en evidencia la falta de planificación en el desarrollo de la

infraestructura eléctrica y física de carga a nivel ciudad, así como los procedimientos previstos de carga y gestión de las baterías en el corto, mediano y largo plazo. Las inspecciones en terreno junto con las entrevistas realizadas mostraron que existe una brecha entre la construcción del electroterminal con los protocolos que rigen el diseño y construcción de electroterminales en otras ciudades de la región (en particular Santiago de Chile), al igual que en los que regulan la comunicación entre el vehículo y el cargador, permitiendo

una gestión de carga inteligente (por ejemplo, optimizando episodios de carga para reducir costos y degradación de batería). Estos aspectos todavía no es tan normados en Colombia pero si pueden ser abordados en licitaciones. Igualmente, se diagnosticó que no existe un protocolo que permita la interoperabilidad de los buses e infraestructura de carga. Es decir, que en el momento de licitar e integrar nuevos electroterminales o buses eléctricos al SITM, los protocolos de carga y comunicación sean estandarizados, permitiendo que los mismos sean usados en toda la operación de la ciudad.

También se identificó la importancia de contar con protocolos de seguridad y gestión de riesgo para operaciones de alta potencia para los concesionarios y los electroterminales que están operando. En el caso del SITM-MIO, actualmente el sistema utilizado por el operador es un sistema de carga continua (carga rápida), con protocolo de carga chino (GB/T) que, en general, ha mostrado en términos relativos, no ser suficientemente flexible cuando se quiere incorporar telemetría u otras herramientas que permitan un nivel elevado de monitoreo y seguimiento de los buses y los eventos de carga por parte de terceros. De todas formas, a la fecha, los 13 cargadores de 120 kW de potencia con dos conectores, instalados en el patio del operador, no han mostrado mayores problemas ni en el momento de instalarlos ni en su uso cotidiano. Además, se constató que el terminal usado disponía de extintores, sistema de aspersión para control de incendios, sensores de alta temperatura, módulo de protección para alta tensión y de vibraciones.

2.2.2.

Planificación de operaciones, asignación y programación de flota

Para gestionar la flota de transporte público, el MIO hace uso de una programación genérica con el software IVU.suite, a la cual cada concesionario complementa con una más detallada para la organización de su operación y gestión de vehículos y conductores. En la actualidad, no está disponible el módulo de gestión de flota de buses eléctricos en la plataforma IVU.suite utilizada para la programación de la oferta, por lo que los operadores realizan preprocesos para incluir las variables de autonomía de los buses y tiempos de recarga en el software, lo cual dificulta una programación específica para esta flota. Sin embargo, el MIO tiene desarrollada una alta capacidad en términos de planeación, programación y gestión de flota, con un equipo humano capacitado y herramientas tecnológicas para esta gestión, tal como el centro de control donde es posible observar la operación de cada uno de los buses del sistema y solucionar posibles problemas que se ocasionan en ruta.

De igual modo, se constataron una serie de factores que limitan la operación de buses eléctricos en todas las rutas que opera el MIO. En algunos casos, se trata de restricciones asociadas a la infraestructura vial, tales como estaciones con plataforma alta en corredores BRT¹⁶, o vías inadecuadas para realizar giros y con resaltos, que afectan el servicio de los buses eléctricos de la flota. En otros casos, es posible que la autonomía de los buses no sea la adecuada

¹⁶ Actualmente los buses eléctricos no pueden acceder a esta infraestructura, debido a que son de plataforma baja y no cuentan con puertas izquierdas, condiciones que inicialmente estaba prevista pero que se modificó al momento de la compra de los vehículos.

para maximizar el uso de la flota de buses. De todos modos, se evidenció la necesidad de hacer un estudio más detallado del potencial de electrificación de las rutas del MIO para maximizar el uso de la flota de buses eléctricos, ayudando a rentabilizar en un menor tiempo esta inversión. Es por ello que se desarrolló un Plan de Servicio de Operación (PSO) adecuado para esta flota, considerando las rutas idóneas para la operación eléctrica.

2.2.3. Mantenimiento y monitoreo de flota

Uno de los aspectos fundamentales para garantizar la operación de la flota de transporte público son los servicios de posventa. Es decir, el mantenimiento de la flota y el monitoreo de esta, no sólo para conocer más de cerca su desempeño, sino también para dar la posibilidad de hacer mantenimientos preventivos. En el caso de la flota de buses eléctricos operados en el SITM de Cali, esta responsabilidad recae en sus concesionarios. A su vez, en muchos casos las responsabilidades del mantenimiento de la flota son compartidas entre distintas entidades, siendo tercerizados un número considerable de estos servicios. En la flota eléctrica actual del SITM-MIO, el concesionario se hace cargo de la gestión de los aspectos mecánicos del vehículo, mientras que los asuntos mayores relacionados con el sistema eléctrico recaen sobre el proveedor de buses. Actualmente, se ha constatado que sólo existe un servicio técnico certificado por la marca de buses eléctricos que operan en la ciudad. A su vez, el gran número de actores y responsabilidades compartidas en el mantenimiento de

la flota eléctrica requiere de contratos claros, con responsabilidades compartidas y garantías bien delineadas, para reducir la incertidumbre sobre la vida útil de las unidades en operación; algo que no está completamente protocolizado para las subsiguientes incorporaciones de flotas de buses eléctricos.

En términos de la operación de la flota eléctrica, hay varios aspectos de mantenimiento que pueden tener un impacto negativo en su desempeño. En el caso de Cali, los buses eléctricos han presentado problemas con el ajuste de los parámetros de potencia y/o torque, dadas las distintas condiciones de infraestructura vial sobre las que tienen que operar. Igualmente, el mantenimiento por ingreso de polvo y otros tipos de material particulado a los sistemas eléctricos puede ser recurrente. Así mismo, tampoco se ha constatado a la fecha que exista una guía general de mantenimiento que los distintos concesionarios de buses eléctricos puedan replicar o, por lo menos, que permita sentar las bases de lo mínimo que debe cumplirse para asegurar la disponibilidad de flota del SITM. En relación con la disponibilidad de repuestos, el servicio tercerizado por el proveedor de flota tiene stock para todas las mantenciones preventivas y, en el caso de daños graves, la importación debe realizarse en un plazo corto de tiempo, según el contrato establecido entre las partes. Sin embargo, no existen requerimientos de stock mínimo para repuestos claves, punto que debería ser exigido en las futuras licitaciones o compras de este tipo de flota. Finalmente, tampoco existe un protocolo de mantenimiento preventivo y correctivo enfocado en dar durabilidad y seguridad a la infraestructura de carga.

2.2.4.

Capacitación de personal

Para sacar provecho a estas ventajas comparativas de los buses eléctricos, se requiere de una buena planificación y capacitación por parte del operador de transporte público, la autoridad y sus prestadores de servicios. En el caso particular del SITM – MIO, se han realizado distintos esfuerzos por entrenar a conductores y otro personal operativo en el manejo de los buses eléctricos y sus sistemas de carga, sin embargo, aún existen oportunidades para lograr condiciones adecuadas en términos de capacidades relativas a la operación de la flota eléctrica:



Personal de Operación: hay escasez de conductores que estén capacitados correctamente para la operación de la flota eléctrica, a pesar de haber

avanzado en formar a un número limitado de conductores para que conozcan de cerca la tecnología de los buses eléctricos, sepan cómo hacer uso apropiado de sus frenos regenerativos y entiendan los límites operacionales de los vehículos.



Personal de mantenimiento y gestión de flota: En relación con el personal de mantenimiento, durante los primeros tres meses de la llegada de las unidades

eléctricas a Cali, 14 ingenieros procedentes de la fábrica en China realizaron las capacitaciones correspondientes. En esta función de mantenimiento, se tiene que abordar la formación de personal

que muchas veces es tercerizado, lo cual agrega un mayor grado de dificultad para asegurar un estándar de calidad en los servicios, sin embargo, se debe trabajar a la par para tener más opciones disponibles en el momento de contratar servicios de posventa para la flota eléctrica.

Deben concretarse los esfuerzos para contar con protocolos relacionados con la capacitación a personal especializado para realizar la carga de los buses, incluyendo todos los aspectos de seguridad relacionados con estas operaciones.



Personal de planificación: también tiene que ser capacitado en el uso especializado de herramientas o módulos específicos de programación de flota eléctrica.

En conclusión, se requiere un programa sistémico de capacitación que permita formar personal en todas las áreas de trabajo que involucran la operación, monitoreo y mantenimiento de buses eléctricos.

Si bien existen múltiples brechas que se tienen que cerrar para asegurar el correcto funcionamiento de flotas de buses eléctricos, existen varias estrategias y herramientas disponibles para facilitar esta tarea. En la siguiente sección, analizaremos en más detalle algunas propuestas para subsanar las brechas identificadas.

3.

Propuestas para subsanar las brechas para masificación de buses eléctricos



La identificación de los factores operacionales claves que impactan en el escalamiento de la electromovilidad del transporte público es uno de los aspectos más importantes para que el proceso sea exitoso. A continuación, se presentan las principales acciones que se deben tomar para superar los desafíos descritos en el apartado anterior y así poder elaborar planes de acción específicos para que las ciudades incluyan esta tecnología en sus sistemas de transporte.

3.1. Infraestructura de carga

3.1.1 Interoperabilidad

Uno de los desafíos principales en el despliegue de la electromovilidad en el transporte público es la estandarización de los protocolos de carga. Esto es clave para facilitar la interoperabilidad de la infraestructura de carga, pero también incluye el establecimiento de las normas para las instalaciones y los procedimientos

de carga que deben regir en la operación. Es necesario que los entes reguladores definan un estándar, además de las normas internacionales que se considerarán.

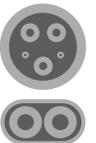
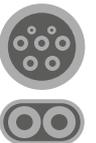
3.1.2. Estándares y protocolos de carga

En general, existen dos tipos de cargadores: de corriente continua (DC) y corriente alterna (AC). Su elección está condicionada principalmente por la tecnología del bus y el nivel de operación que se desea alcanzar, entre otras consideraciones. Para ambas elecciones se debe procurar siempre la interoperabilidad de los sistemas, es decir, que todos los buses y cargadores del sistema de transporte público puedan ser usados independientemente del operador o fabricante de bus. En América Latina y el Caribe, todavía no existe un protocolo regional por armonizar estos estándares. Ahora bien, actualmente podemos constatar que varios de los estándares mencionados en el siguiente texto se encuentran en los buses eléctricos de nuestras ciudades. Sin embargo, más recientemente parece haber una inclinación hacia los protocolos de carga europeos (CCS-2), dada su flexibilidad operacional.



Figura 9

Conectores para vehículos eléctricos, por región y tipos de corriente

	Norteamérica	Europa	China	Japón	OppCharger
AC					
	SAE J1772 Tipo 1	IEC 62196 Tipo 2	GB/T	SAE J1772 Tipo 1	
DC					
	Combinado Tipo 1	Combinado Tipo 2	GB/T	CHAdeMO	SAEJ3105 IEC 61851-23

Cargadores AC

- Tipo 1 o J1722, de acuerdo con la normativa SAE J1772.
- Tipo 2 o Mennekes, de acuerdo con la normativa IEC 62196-2:2016.
- GB/T, de acuerdo a la GB/T 20234.2-2015, Connection set for conductive charging of electric vehicles—Part 2: AC charging coupler (Guojia Biaozhun o Estándar Nacional), de acuerdo a la Administración de Normalización de China, el Comité Nacional Chino de ISO e IEC.

Cargadores CC

Poseen el inversor de corriente (AC-DC) integrado, por lo que el bus no requiere inversor. Carga directamente al pack de batería, lo que los hace más rápidos.

- Dispositivo CCS-2 o también conocido como CCS combo 2 (CCS, Combined Charging System), de acuerdo con la normativa IEC 62196 Carga conductiva de vehículos eléctricos. Parte 1: Requisitos generales (UNE-EN 62196-1:2015), que indica los requisitos para bases, clavijas, conectores de vehículo y entradas de vehículo.
- GB/T, de acuerdo a la norma GB/T 20234.3-2015, Connection set for conductive charging of electric vehicles—Part 3: DC charging coupler (Guojia Biaozhun o Estándar Nacional), de acuerdo con la Administración de Normalización de China, el Comité Nacional Chino de ISO e IEC.
- CHAdeMO, protocolo utilizado por Japón y Corea, de acuerdo a las normas IEC61851-23, IEC61851-24 (sistema de carga y comunicación) y la IEC 62196.

3.1.3.

Protocolos de comunicación

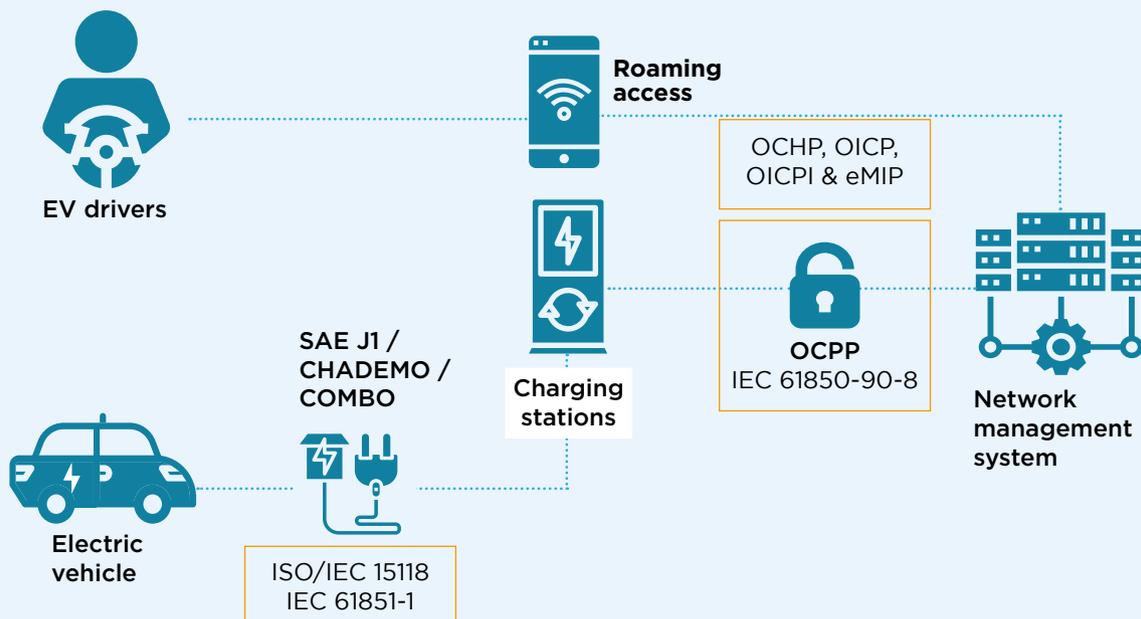
Dentro de la estandarización es importante definir los protocolos de comunicación. Estos comprenden un conjunto de reglas que permiten transmitir información relevante entre dos o más entidades. En el contexto de la electromovilidad, existen diversos protocolos que pueden ofrecer varias funcionalidades para comunicar las distintas entidades que participan en la electromovilidad. Por ejemplo, entre una estación de carga y un vehículo eléctrico se pueden tener protocolos que faciliten la comunicación entre ambos para establecer parámetros de seguridad, como, por ejemplo: la verificación de que hay una buena conexión, la identificación del vehículo, la potencia máxima de carga soportada y otros parámetros que permitan lo que se denomina smart charging. Además, existen protocolos

para comunicar los puntos de carga con el operador del servicio (Charge Point Operator, CPO por sus siglas en inglés) permitiendo transmitir información sobre la red, cargas realizadas por cada estación u otra información relevante para el negocio del CPO.

Dentro de los protocolos utilizados internacionalmente, se encuentran los OCPP (Open Charge Point Protocol) y el OSCP (Open Smart Charging Protocol), que son promovidos por la Open Charge Alliance (OCA)¹⁷. Este protocolo soporta 129 tipos de datos y cuenta con 16 funcionalidades, que suman en total 116 casos de usos. Entre las funcionalidades se incluyen los ámbitos de seguridad, control de autorización, manejo de transacciones, control remoto, disponibilidad de flota, capacidad de hacer reserva, soporte para ISO 15118, entre otros.



¹⁷ La Open Charge Alliance es un consorcio global de líderes en infraestructura de vehículos eléctricos públicos y privados que se han unido para promover estándares abiertos a través de la adopción del *Open Charge Point Protocol* (OCPP) y el *Open Smart Charging Protocol* (OSCP).

Figura 10Protocolos de comunicación¹⁸

La figura, basada en una realizada por ElaadNL¹⁹ en 2016, presenta algunos protocolos en distintos roles dentro del ambiente de la electromovilidad. Es posible que un protocolo se concentre en un solo aspecto de la comunicación, en este caso, se pueden tener distintos protocolos a la vez en una comunicación.



Vehículo eléctrico- Estación de Carga

- IEC 61851-1: es una norma publicada en 2010, que se refiere a la carga básica. Es una norma oficial IEC,

creada por el “Comité técnico IEC 69 (TC69): Vehículos eléctricos de carretera y camiones eléctricos industriales”.

- IEC/IEC 15118: el grupo de trabajo conjunto ISO / IEC 15118 para la interfaz de comunicación de vehículo a red (V2G CI) se fundó en 2009. En esta especificación se describe una forma de comunicación más avanzada, también conocida como Comunicación de Alto Nivel (HLC). Esto permite que los vehículos eléctricos comuniquen información (por ejemplo, estado de la carga de la batería) a un punto de carga de forma autónoma.

¹⁸ Greenlots (2019). Open vs. Closed Charging Stations: Advantages and Disadvantages. Disponible en: <https://www.openchargealliance.org/uploads/files/OCA-Open-Standards-White-Paper-compressed.pdf>

¹⁹ ElaadNL (2019). EV Related Protocol Study: Original Study Report Version 1.1. Disponible en: https://www.elaad.nl/uploads/files/EV_related_protocol_study_v1.1.pdf



Estación de Carga- Sistema central

- OCPP. Protocolo abierto y bidireccional de comunicación, protocolo de que funciona como intermediario entre las estaciones de carga y el sistema de administración de la red. Al ser un protocolo abierto, facilita la interoperabilidad, quitando la necesidad de utilizar protocolos propietarios. Actualmente se encuentra en su versión 2.0.1 (lanzada en abril de 2018).

IEC 61850-90-8: no es un protocolo en sí mismo, sino un informe técnico que describe un modelo de objetos para la movilidad eléctrica. El propósito principal de IEC 61850-90-8 es modelar la movilidad eléctrica en IEC61850-7-420 ed. 2 para la integración con otros tipos de fuentes de energía –como la fotovoltaica y la eólica– con un alto nivel de seguridad e interoperabilidad.



Roaming

- OCHP: protocolo destinado a intercambiar datos de autorización, transacciones de cobro y datos de

información de puntos de cobro para roaming. El protocolo consta de dos partes: una que es específica para la comunicación entre las partes del mercado y una cámara de compensación²⁰ de vehículos eléctricos. La segunda parte es para la comunicación entre pares entre las partes del mercado, lo que se llama OCHPdirect.

- OCPI: el protocolo está diseñado para intercambiar información sobre puntos de recarga. El protocolo es para el intercambio de información entre los roles de mercado del operador de punto de recarga y el proveedor de servicios de movilidad electrónica. Estos roles no están separados en todos los mercados.
- OICP: es un protocolo creado por Hubject en 2013. Esta plataforma permite el intercambio de mensajes entre el proveedor de servicios de e-mobility y un operador de puntos de carga.
- eMIP: es proporcionado por la organización GIREVE y tiene como objetivo los siguientes puntos: la habilitación de la itinerancia de los servicios de carga, proporcionando una autorización de carga y una API de cámara de compensación de datos; otorgar acceso a una base de datos completa de puntos de recarga y proporcionar funciones de carga inteligente.

²⁰ Institución financiera que ofrece servicios de compensación de pagos y liquidación a sus miembros sobre transacciones de productos financieros.

3.1.4

Infraestructura eléctrica en electroterminales

En paralelo a la estandarización de la carga es necesario desarrollar una planificación de las soluciones para la carga de los buses, estimando los requerimientos de potencia y energía en los patios de los operadores o distintos puntos de carga. También se debe optimizar la carga mediante sistemas de administración de los cargadores que permitan una planificación inteligente de la carga de los autobuses. Esto permite desarrollar una estrategia que optimice los episodios de carga para minimizar el costo de operación –por ejemplo, cargando cuando el costo de energía es más bajo– y maximizar la vida útil de las baterías.

Antes de la construcción o ampliación de un terminal eléctrico deben establecerse ciertos parámetros y especificaciones para la incorporación de vehículos con esta tecnología. Estas medidas se basan en la instalación del cargador y todos los demás componentes que tienen como función proteger o formar parte de la marcha operacional del mismo. Además, se deben establecer enfoques y directrices básicas para generar un sistema adecuado, dimensionado y seguro. Por ello, hay que considerar todos los componentes constructivos que hacen posible la puesta en marcha y operación del terminal, entre los que se encuentran:

- **Obra civil:** losa y estructura, canalizaciones y sala eléctrica.
- **Obra eléctrica:** equipos de transformación de media a baja tensión, tableros eléctricos e infraestructura de carga.

En la actualidad no existen en el país normativas adoptadas que permitan reducir la posibilidad de fallas, tales como problemas con la durabilidad de la infraestructura del cargador, posibles inundaciones y requisitos constructivos para una operación eficiente del terminal. En el caso de Chile, en octubre del año 2020 se publicó un reglamento técnico específico (RIC N°15)²¹ para las instalaciones eléctricas destinadas a la recarga de vehículos eléctricos, el cual establece los requisitos de seguridad que deben cumplir las instalaciones. A su vez, las bases de licitación presentadas para el suministro de flota eléctrica, en el transporte público de Santiago de Chile incluye requerimientos adicionales para la infraestructura de carga en electroterminales. Colombia parece seguir un camino similar con iniciativas por parte del Ministerio de Minas y Energía y su Unidad de Planeación Minero Energética (UPME).

Con relación al desarrollo de la infraestructura de carga, esta debe ser acorde al avance de la electromovilidad en la ciudad, para lo que es necesaria una estimación de la potencia necesaria para la electrificación del sistema. En el siguiente esquema se presenta, de modo general, una metodología para abordar este componente.

²¹ Superintendencia de Electricidad y Combustibles de Chile (2020). Pliego Técnico Normativo: RIC No 15. Disponible en <https://www.sec.cl/sitio-web/wp-content/uploads/2020/10/RIC-N15-Infra-para-la-recarga-de-vehiculos-electricos-Final.pdf>

Figura 11

Metodología para determinar la factibilidad eléctrica de electroterminales



Fuente: Elaboración propia

En general, se recomienda trabajar con una conexión de media tensión, esto ayuda a evitar efectos adversos de las corrientes de fuga de los rectificadores. Respecto a los cargadores, se recomienda tener un cargador extra de reserva, esto da dos conectores de respaldo en casos de contingencia. También es importante considerar un factor de seguridad al calcular la potencia total del terminal. Por la experiencia en la construcción de electroterminales en Chile, se considera un 25% adicional de potencia. Así, se disminuye el riesgo que las protecciones eléctricas conmuten al iniciar la carga, o que los cables se calienten a mayores

distancias, entre otros problemas. Así mismo, se debe tener en consideración que todos los cálculos sean realizados en condiciones ideales de temperatura y humedad.

Siguiendo con la línea del párrafo anterior, es importante considerar un sistema de respaldo, formado por generadores, que cubra un porcentaje de la potencia del terminal. Así, en caso de un corte o la falla de un transformador en el sistema, se puede continuar con la carga. Se recomienda cubrir al menos un 50% de la potencia del terminal. Sin embargo, hay que hacer referencia a los reportes de confiabilidad

de la red eléctrica para determinar de mejor manera este porcentaje de potencia a cubrir.

Adicionalmente, es recomendable usar tableros de distribución con protecciones según la norma IEC 60364-7-722 o equivalente, con el objetivo de garantizar una operación correcta y segura de los equipos de carga.

Finalmente, es ideal el desarrollo de un centro de carga emplazado en un lugar estratégico en el centro de la ciudad o sector de mayor confluencia de rutas electrificadas, que permita una carga rápida para los distintos operadores, facilitando el incremento de la autonomía de los vehículos y, como consecuencia de ello, la posibilidad de ampliar la cantidad de rutas donde los autobuses eléctricos podrían operar. Este tipo de proyecto puede ser clave para acelerar el escalamiento, por lo que se propone avanzar en su conceptualización, así como en sus estudios de factibilidad y en el diseño de un modelo de negocios que permita a los operadores entender cómo y en qué condiciones podrían hacer uso de este servicio.

3.2.

Planificación de operaciones, asignación y programación de flota

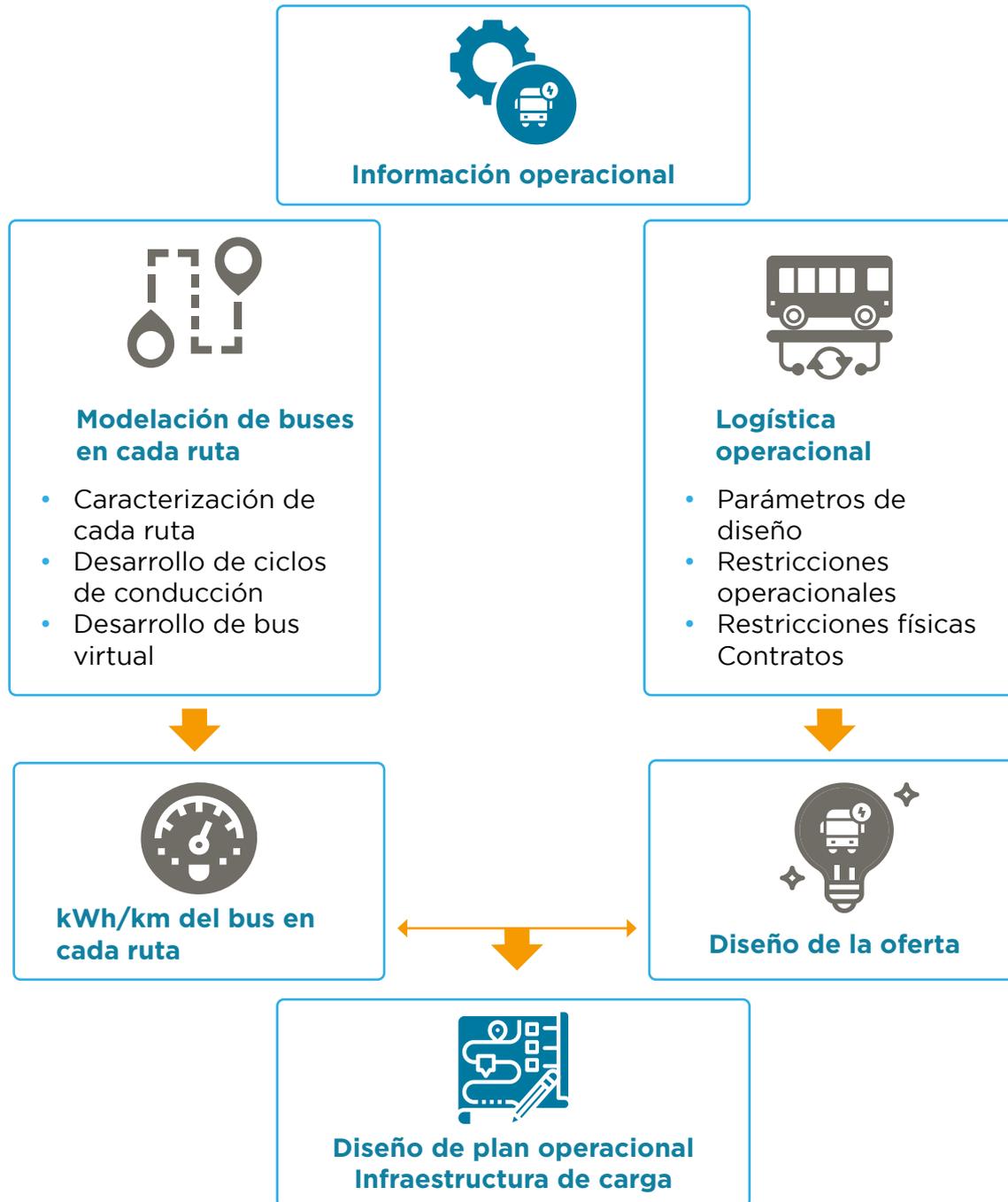
Uno de los desafíos identificados durante la puesta en marcha de una operación con buses eléctricos es la falta

de integración de esta tecnología a las plataformas o metodologías de asignación y programación de flota. En este sentido, es importante que el ente regulador defina las futuras etapas de la introducción de los buses eléctricos en los sistemas de transporte público, identificando cuáles operadores debieran ser los próximos en incorporar estos vehículos en sus flotas y, de esta forma, generar las condiciones para que la operación de estos nuevos vehículos sea operacional y comercialmente viable. Las prestaciones de los buses eléctricos varían en función de las distintas características físicas y operacionales de las rutas, por lo que es necesario planificar su introducción empleando herramientas de modelación y los resultados de los pilotos para seleccionar las líneas más apropiadas para el escalamiento. Las estrategias de carga de los buses y la disponibilidad de una red de carga pueden, además, facilitar un aumento de los kilómetros comerciales. En el caso de la ciudad de Cali, la programación de flota y de conductores es responsabilidad de los concesionarios de transporte y se basa en el diseño de oferta que el ente gestor define para cada una de las rutas. Para realizar este diseño de oferta, el ente gestor tiene en cuenta los niveles de demanda observados en cada una de las rutas, incluyendo como restricción los niveles de servicio mínimos estipulados en los contratos de concesión de transporte.

Específicamente para realizar una adecuada planificación para la flota eléctrica, es necesario considerar dos componentes: la estimación de energía consumida por el bus en cada ruta y la logística operacional, tal como se presenta en la siguiente figura.

Figura 12

Metodología para el diseño de un plan operacional



3.2.1.

Modelación del consumo de energía del bus en cada ruta del sistema

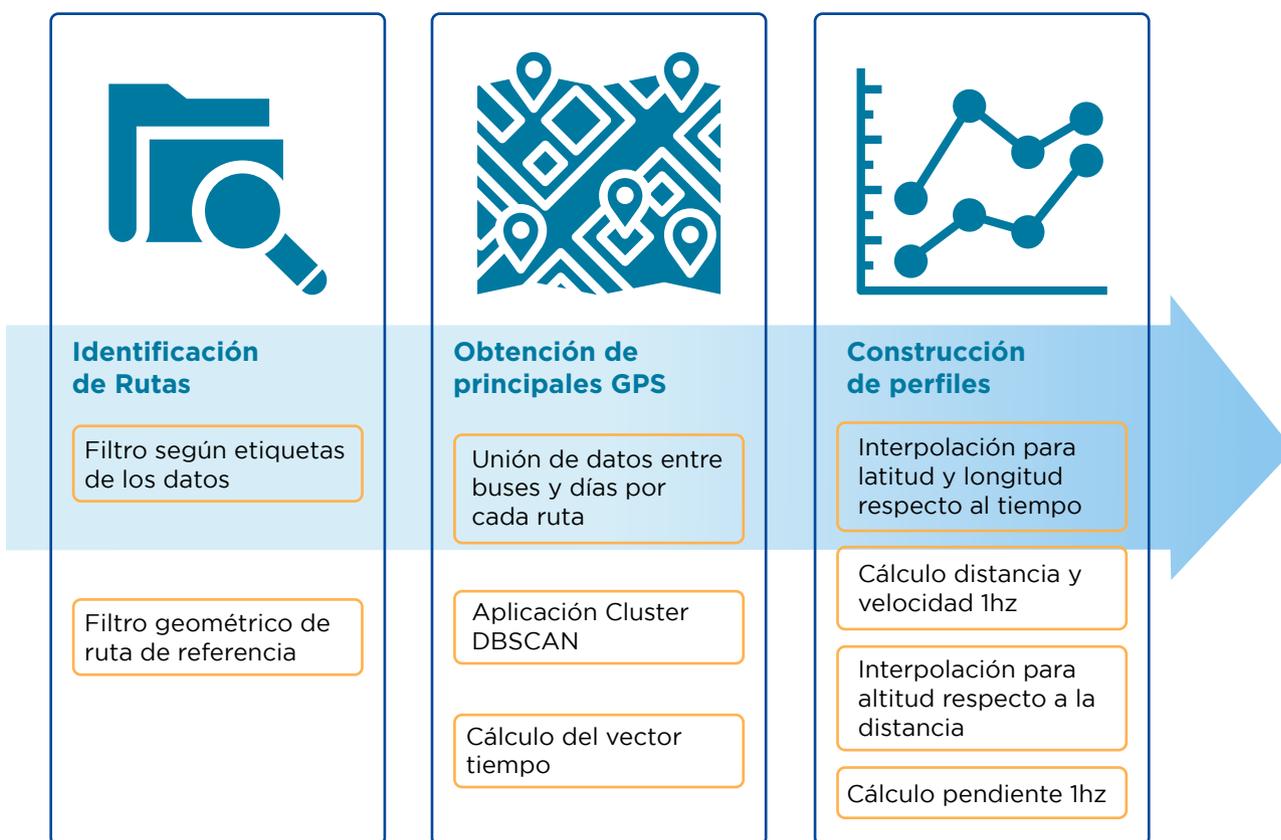
La metodología se basa en el procesamiento de datos de la flota actualmente en operación o en datos medidos en pruebas de ruta, el desarrollo de ciclos de conducción para los recorridos identificados y la simulación/modelación de consumos de energía a través de un modelo virtual del bus a partir de la configuración de cada uno de sus componentes y sistemas.

Construcción de perfiles de rapidez, altitud y pendiente mediante datos GPS

La metodología general se presenta en la Figura 13. No se encuentra el origen de la referencia, donde se indica que los datos provienen de dos fuentes: la primera con información de GPS, idealmente de al menos una semana de operación, y la segunda fuente con información de la georreferenciación de cada ruta.

Figura 13

Procedimiento general de la metodología para la construcción de perfiles en Cali



Identificación de rutas

Los datos se agrupan en dos filtros: uno basado en las etiquetas de la base de datos GPS²² y el otro basado en el análisis geométrico de las posiciones de GPS.

El primer filtro consiste en separar los datos por día y según las etiquetas (identificación de ruta o bus), formando grupos de datos que contienen posiciones de GPS, tiempo en segundos y un código identificador del grupo asociado a cada etiqueta. El segundo filtro consiste en utilizar las georreferenciaciones de las rutas para formar máscaras geométricas que actúan dependiendo de la etiqueta “identificación de ruta” de los datos agrupados anteriormente.

Obtención de principales puntos GPS por ruta

Se aplica una técnica de agrupamiento automático DBSCAN²³ modificada a los datos filtrados con información de tiempo y distancias por cada grupo de datos separados por ruta. Con esto, cada agrupamiento representa un conjunto de puntos de GPS de una ruta determinada, para luego calcular los promedios para cada parámetro de distancia y tiempo. Finalmente, los puntos de GPS son reordenados utilizando la ruta de referencia y se construye un vector tiempo para los puntos de GPS, corregidos con la

ayuda de los parámetros distancia, tiempo y la distancia recorrida por la ruta de referencia.

Construcción de perfiles y optimización

Hasta este punto, cada ruta posee principales puntos de GPS y un vector de tiempo construido en el punto anterior. Luego, se interpolan las latitudes y longitudes con respecto al tiempo y se calculan las distancias. Las posiciones GPS interpoladas se transforman a cartesianas y se calcula la distancia recorrida, la velocidad y el perfil de altitud.

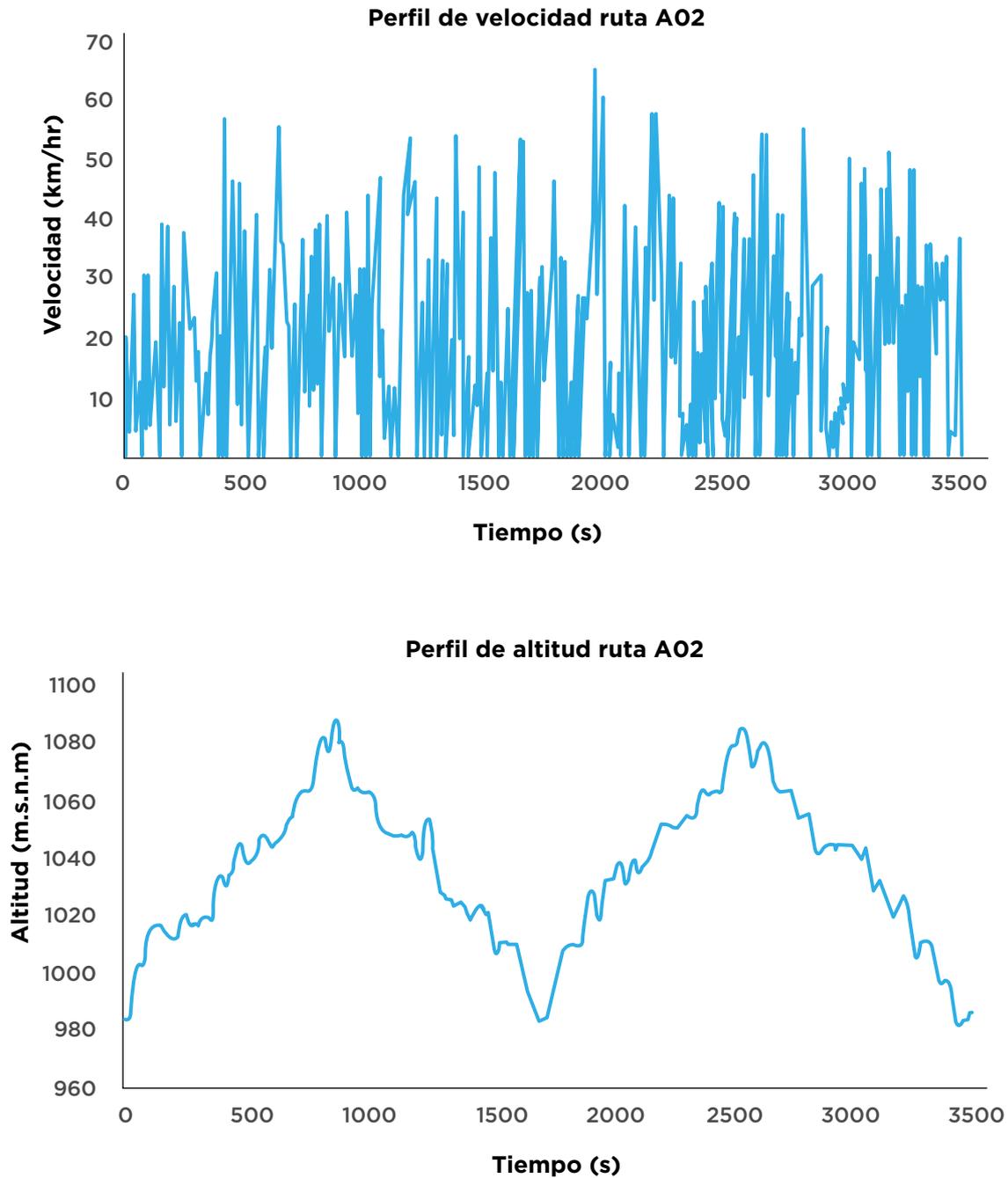
Finalmente, el perfil final es optimizado considerando las aceleraciones máximas que podría experimentar un bus y la distancia que debería recorrer según su ruta de referencia. Este ejercicio parte de la idea de que las aceleraciones/desaceleraciones de confort máximas en buses de transporte público es de 31,2 m/s² y que el bus debe detenerse en todas las paradas. Esto trae como consecuencia que el perfil de velocidad alcance menos distancias, pues se irá aminorando el valor de sus máximos. Para contrarrestar esto, se utiliza la distancia de referencia para poder controlar la pérdida de distancia, dado un tiempo de recorrido fijo.

²² Estas dependen de cada sistema de transporte. Dentro de las etiquetas se puede encontrar la identificación del bus, de la ruta, orientación de la ruta posiciones de longitud y latitud, entre otros indicadores.

²³ “Agrupamiento espacial basado en densidad de aplicaciones con ruido” o Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN).

Figura 14

Perfiles de velocidad y de altitud de una ruta en particular



Fuente: Elaboración propia

²³ “Agrupamiento espacial basado en densidad de aplicaciones con ruido” o Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN).

Modelación de la operación de buses eléctricos a batería (BEBs), desarrollo de bus virtual y cálculo de indicadores claves²⁴

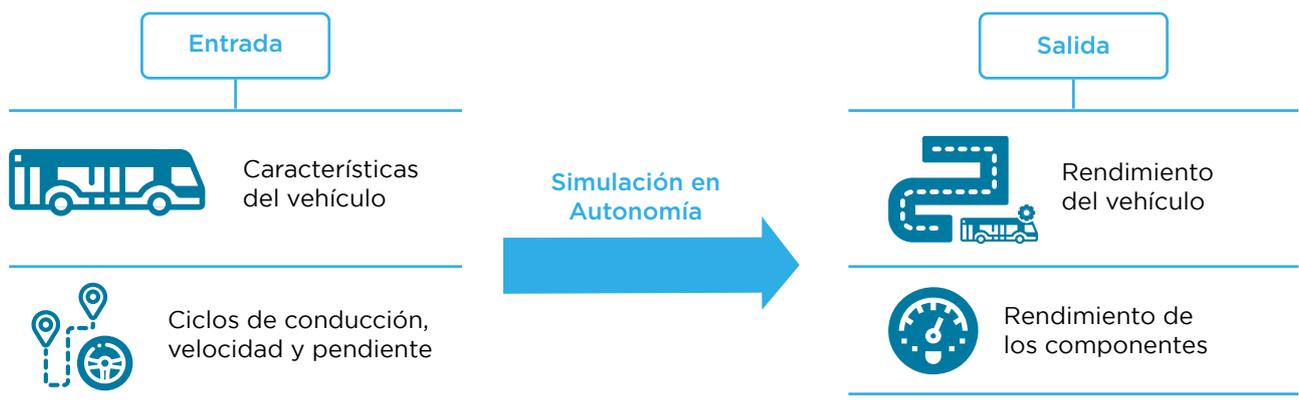
Luego de obtener los ciclos de conducción, se utiliza una herramienta de modelación de operación de vehículos²⁵, la cual simula el comportamiento de un vehículo operando en una ruta bajo condiciones definidas por el usuario. Para esto se debe desarrollar un modelo virtual del vehículo a partir de la configuración de cada uno de sus componentes y sistemas

– que para el caso de un vehículo eléctrico corresponden, entre otros, al motor, sistema de transmisión, diferenciales, ruedas, neumáticos, controladores, baterías, pesos, dimensiones y aerodinámica-. Posteriormente, se debe configurar el ciclo de conducción en el que se desea evaluar el vehículo, el cual contiene la información de velocidad y pendiente de la ruta, más las condiciones ambientales y de peso de pasajeros.

La metodología general para la modelación de consumos de energía se presenta en la siguiente figura.

Figura 13

Metodología general para la modelación



Fuente: Elaboración propia

²⁴ Yancho Todorov (2020). "Simulations drive the electric bus revolution". VTT. Web. Disponible en: <https://www.vttresearch.com/en/news-and-ideas/simulations-drive-electric-bus-revolution>

²⁵ CMM emplea las herramientas e-Fleet del VTT y Autonomie de ENRL. En el proceso de construcción del bus virtual se decidirá cuál es la más apropiada para esta aplicación.

3.2.2.

Logística operacional

Para realizar pruebas enfocadas en obtener la mejor programación posible para los buses eléctricos, se debe tener en cuenta las siguientes condiciones relevantes para la programación de buses eléctricos:

- Autonomía reducida dependiente del tamaño de la batería de autonomía.
- Variación del consumo energético dependiendo de las condiciones espaciales de las rutas.
- Posibilidad de implementar cargas parciales que aumenten la cantidad de kilómetros factibles de ser recorridos por vehículos

A continuación, se presentan algunas recomendaciones generales asociadas a optimizar la planificación de la operación de los buses eléctricos.

Trazado de las rutas

Uno de los elementos claves en el diseño de servicios es la determinación de su trazado. Este proceso incluye tanto la definición de las vías por las cuales circulará el vehículo, como la densidad y ubicación de paradas a lo largo del corredor. Dentro de este enfoque, el equipo del ente gestor en conjunto con el operador debe determinar la factibilidad de uso de buses eléctricos en cada una de las rutas. Este análisis se debe realizar teniendo en cuenta las condiciones espaciales y de autonomía de la flota eléctrica actual. De esta forma, la inviabilidad determinada para algunas de las rutas puede cambiar si se ajustan las condiciones de trazado de la ruta y/o las condiciones presentes en los vehículos actuales.

Tiempos de permanencia

La restricción impuesta a los tiempos de permanencia es, en muchos de los casos, una importante limitación para optimizar la operación de los buses eléctricos. Para eliminar esta restricción es necesario adecuar los puntos de control o dar preferencia de espacio y tiempo a los buses eléctricos sobre los buses diésel. Es necesario evaluar el aumento de los tiempos de permanencia, lo que puede estar acompañado de la instalación de infraestructura de carga en los extremos de las rutas, lo cual permite reducir los kilómetros muertos de los buses eléctricos.

3.3.

Mantenimiento y monitoreo de flota

En la operación de buses eléctricos, los sistemas de mantenimiento y monitoreo se vuelven aún más cruciales. Los buses eléctricos suelen tener mejor rendimiento que los buses convencionales, pero también suelen tener una menor autonomía. Adicionalmente, los sistemas de carga de buses, dependiendo de la estrategia optada, pueden tener eventos de carga de varias horas. Es aquí donde los sistemas de monitoreo de flota especializados para flotas eléctricas o flotas mixtas (buses convencionales y buses eléctricos) pueden reducir significativamente los problemas asociados con la disponibilidad de flota. Estos prevén los eventos de carga y pueden sincronizar mejor el despacho de unidades para reducir interrupciones al servicio.

De igual forma, los sistemas de carga inteligente ayudan a maximizar la vida útil de las baterías de los buses eléctricos, programando de forma inteligente la carga y descarga de las mismas. Las baterías de un bus eléctrico son el componente más costoso del vehículo, por lo que las estrategias que permiten prolongar su vida útil aumentan la rentabilidad de la inversión inicial. Los Sistemas de Carga Inteligente pueden monitorear el estado de salud (SOH, por su sigla en inglés) de las baterías de un bus, es decir, su estado de deterioro, ya que las baterías pierden capacidad de almacenamiento con su edad y uso. Al monitorear el SOH se pueden adecuar los ciclos de conducción y de carga del vehículo para maximizar la vida útil de las baterías del bus. Igualmente, estos sistemas ayudan a programar mejor los eventos de carga para reducir la carga al sistema eléctrico (algo que puede reducir inversiones de infraestructura eléctrica), así como a adecuar los eventos a menores costos de energía.

El monitoreo de baterías es de suma relevancia cuando se tienen garantías para estos componentes –de parte de fabricantes o comercializadores–, que se aplican después de un deterioro significativo de la capacidad de carga de las baterías. Igualmente, pueden ayudar a hacer mantenciones preventivas (por ejemplo, cambio de celdas de batería) que permitan prolongar la vida útil de las baterías. Cabe resaltar que para tener acceso al mayor número de empresas proveedoras de estos servicios –tanto de monitoreo de flota como de carga inteligente– se debe privilegiar los protocolos de comunicación abiertos entre el vehículo y las estaciones de carga.

Es necesario establecer un programa de monitoreo que permita recabar información relativa a la operación de los vehículos, al comportamiento de los cargadores, al proceso de carga de los autobuses y el desempeño de los conductores, y que, además, lleve un registro de incidentes y situaciones excepcionales relacionadas con la operación de los buses.

Así mismo, para realizar un programa de monitoreo y mantenimiento preventivo se deben tener protocolos de comunicación abiertos para tener acceso a la información del bus Controller Area Network (CAN bus²⁶) y del cargador, de esta forma se pueden establecer Indicadores Claves de Rendimiento (KPIs, por su sigla en inglés) en base a esta información para hacer un seguimiento óptimo de la flota. Teniendo esta información disponible, la autoridad puede monitorear las garantías que indican los fabricantes sobre las baterías y su durabilidad, además de ser un elemento central en la gestión de flota.

Desde el punto de vista de la mantención preventiva, al tener acceso a la información por telemetría de parámetros como por ejemplo el de voltajes, se puede establecer el estado de salud de la batería. De esta manera, si se presenta algún problema en alguna celda, esta se puede identificar y sustituir, realizando una mantención preventiva antes de que produzca un mayor efecto en pack de baterías.

Los parámetros mínimos a adquirir desde el CAN Bus deberían ser los siguientes:

- Velocidad instantánea km/h, obtenida directamente del CAN bus.

²⁶ Protocolo que conecta los sistemas y sensores en aplicaciones automotrices

- Estado de carga de las baterías (SOC %, por sus siglas en inglés).
- Autonomía restante instantánea (km).
- Geoposicionamiento (GPS): latitud, longitud, altitud.
- Voltaje [V] y corriente [A] de cada pack de baterías.
- Voltaje [V] y corriente [A] de los motores generadores.
- Voltaje [V] y corriente [A] de los accesorios eléctricos.
- Temperatura [°C] de cada pack de baterías.

Con base en los parámetros adquiridos desde el CAN bus, se debería desarrollar un plan de seguimiento de la operación, tanto de los buses como de los cargadores. Este programa debería incluir como mínimo los siguientes KPI:

Tabla 6

Parámetros de operación de buses eléctricos

Especificaciones técnicas de bus	Recarga
Fabricante	ID Bus por Ruta
Modelo	Horas promedio de recarga diaria
Medida de neumáticos	Estado de carga de batería antes de recarga [% promedio]
Capacidad de baterías (kWh)	Cargador
Protocolo de carga	Marca
Bus	Disponibilidad diaria en promedio [%]
ID Bus por Ruta	Causas de no disponibilidad
Número de días programados con salida	Causa más frecuente
Disponibilidad diaria promedio [%]	Costo promedio [kW/h]
Causas de no disponibilidad	Mantenimiento
Causa más frecuente	Bus
Operacion	Gasto mantenimiento promedio [\$/km]
ID Bus por Ruta	Descripción mantenimiento
Kilometraje diario promedio	Mantenimiento más frecuente
Horas diarias promedio	Cargador
Número de viajes ida y vuelta diarios	Gasto mantenimiento promedio [\$/día]
Consumo energía promedio ida (kWh/km)	Descripción mantenimiento
Consumo energía promedio vuelta (kWh/km)	Mantenimiento más frecuente

Fuente: Elaboración propia

3.4.

Capacitación de personal

Uno de los mayores retos para introducir una nueva tecnología en una operación de transporte público es la capacitación de personal, en todas las áreas de servicio. En particular, se evidencia una barrera importante para la introducción de la electromovilidad desde el punto de vista de los conductores, debido a la falta de disponibilidad en el mercado, lo que reduce las posibilidades de hacer cursos de entrenamiento debido a la baja calificación de los conductores existentes y la alta rotación de ellos. Esto es un problema que afecta al sistema en su totalidad, más allá de los autobuses eléctricos, por lo que su solución trasciende a la planificación de la introducción de buses eléctricos.

Independientemente de ello, se requiere desarrollar cursos de entrenamiento de conductores en conducción eficiente y principios de operación y manipulación de vehículos eléctricos para generar condiciones para que la tecnología entregue sus mejores prestaciones tanto operacionales como en seguridad. Esto permite el desarrollo de empleos verdes y en algunos casos puede ser un impulso para incluir una perspectiva de género en el sector transporte. Por ejemplo, en el caso de Santiago de Chile, la presente licitación de renovación de flota incluye la exigencia que un 7,5% del personal de operación y mantenimiento sean mujeres en un plazo de 2 años al igual que asegurar la certificación Norma Chilena 3262:2012 sobre gestión de igualdad de género y conciliación de la vida laboral, familiar y personal²⁷.

También el personal encargado del soporte, manutención y carga de los buses debe recibir entrenamiento para especializarse en esta tecnología, la que en parte debe estar comprendida en las responsabilidades de los proveedores de buses, pero también de los institutos de formación técnica. Para estos fines se recomienda que cada ente gestor establezca una línea de colaboración con el servicio de nacional de aprendizaje (SENA), institutos y universidades locales para promover la incorporación de estos aspectos en la malla educativa de profesionales y técnicos del área, así como permitir el acercamiento de estas instituciones a las operaciones de buses eléctricos y sus sistemas de carga, de forma tal de facilitar la formación práctica de sus alumnos.

Además, se deben desarrollar capacidades dentro del ente gestor para generar un ambiente adecuado en la implementación de la electromovilidad. Dentro de los principales temas que se deben abordar se encuentran:

- Criterios para el diseño de electroterminales: principales definiciones en el diseño, diagramación y condiciones de construcción de los patios.
- Condición segura y eléctrica en la estación de carga para buses eléctricos: características de las estaciones de carga, correcto uso del cargado y

²⁷ DTPM (2021) resumen: licitación de concesión de uso de vías 2019. disponible en: https://www.dtpm.cl/descargas/licitacion20/licitacion%20concesion%20de%20uso%20de%20vias_esp.pdf



principios de la operación de carga, haciendo hincapié en aspectos de mantenimiento preventivo y correctivo.

- Diseño de un electroterminal: cómo pasar de un diseño conceptual a un proyecto, realizar el dimensionamiento, desarrollar escenarios de potencia necesaria para la operación, tomando en cuenta las restricciones eléctricas y un diseño eficiente, realizar un análisis tarifario y finalmente evaluar distintas alternativas constructivas de un electroterminal.
- Proveedores de buses eléctricos y diseño de pliegos de licitación de sistemas de transporte público: necesidad de implementar normas técnicas para los

buses eléctricos, definir estrategias de electrificación de los operadores de transporte público y determinar las prestaciones mínimas que se exigirán en procesos de licitación (consumo de energía, autonomía mínima, degradación máxima de baterías, protocolos de carga y protocolo de comunicación de información).

A continuación, se presenta una tabla que resume las principales recomendaciones desarrolladas en este capítulo, las cuales están divididas por cada uno de los desafíos identificados: Infraestructura de carga, planificación de la operación, mantenimiento y monitoreo de flota y capacitación del personal.

Tabla 7: Desafíos y recomendaciones para la masificación de la electromovilidad en el transporte público mayor de cali.

Desafíos		Recomendaciones
Infraestructura de carga	Estándares y protocolos de carga	Estandarizar el tipo de conector.
	Protocolos de comunicación	Solicitar un protocolo de comunicación abierto.
	Infraestructura eléctrica en terminales	Estimar la potencia y energía requerida por patio. Tener suficiente potencia instalada en la red eléctrica para la incorporación de la electromovilidad.
Planificación de la operación	Consumo de energía en las rutas	Tener información de pilotos de buses eléctricos disponible ⁶ .
		Tener información operacional para realizar modelaciones del consumo de energía para cada ruta.
	Logística operacional	Determinar, por parte del ente gestor y/o operador, las rutas con mayor potencial de ser electrificadas. Averiguar si el software que se utiliza en la planificación permite ingresar buses con tecnología eléctrica (autonomía).
Mantenimiento y monitoreo		Solicitar el monitoreo de la batería.
		Desarrollar un plan de monitoreo de la flota y cargadores.
		Desarrollar un plan de seguimiento con principales KPI de la operación.
Capacitaciones	Operadores	Elaborar un programa de entrenamientos para conducir vehículos eléctricos. Elaborar un programa de entrenamiento a los encargados de soporte, mantención y carga de buses.
	Universidades/ Institutos técnicos	Incorporar en el sistema de educación, carreras o materias afines a la electromovilidad.

fuentes: elaboración propia



Referencias bibliográficas

- Congreso de Colombia. 2019. Ley 1964: Promoción de vehículos eléctricos en Colombia. Bogotá, Colombia
- Congreso de Colombia. 2019. Ley 1972: Medidas tendientes a la reducción de emisiones contaminantes de fuentes móviles. Bogotá, Colombia
- Departamento Nacional de Planeación. 2018 Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES) 3943: Política para el Mejoramiento de la Calidad del Aire, Departamento Nacional de Planeación. Bogotá, Colombia
- Directorio de Transporte Público Metropolitano. 2021. Licitación de Concesión de Uso de Vías 2019. Santiago de Chile
- ElaadNL. 2019. EV Related Protocol Study: Original Study Report Version 1.1. Arnhem, Países Bajos.
- Gobierno de Colombia. 2019. Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica. Bogotá, Colombia
- Gobierno de Colombia. 2019. Ley 1955: Plan Nacional de Desarrollo 2018 - 2022 "Pacto por Colombia, pacto por la equidad". Bogotá, Colombia
- Gobierno de Colombia. 2020. Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC). Bogotá, Colombia
- Greenlots. 2019. Open vs. Closed Charging Stations: Advantages and Disadvantages. Seattle, USA.
- LABMOB. 2020. E-bus Radar. Disponible en: <https://www.ebusradar.org/>
- Ministerio de Energía de Chile. 2020. Plataforma de Electromovilidad. Santiago de Chile.
- Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. 2018. Resolución Exenta 2243. Aprueba Protocolo Técnico para Obtener Consumo Energético en Buses de Transporte Público
- Urbano de la Ciudad de Santiago. Santiago de Chile.
- Superintendencia de Electricidad y Combustibles de Chile. 2020. Pliego Técnico Normativo: RIC No 15. Santiago de Chile.
- Todorov, Y. 2020. Simulations drive the electric bus revolution. VTT Research. Helsinki, Finlandia.
- Unidad de Planeación Minero Energética. 2019. Plan Energético Nacional 2020 - 2050. Bogotá, Colombia

