cooperación alemana
DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

me-mueve

Asesoría para reforzar proyectos de buses eléctricos



Acompañamiento al Estado de Yucatán

Documento descriptivo

Proyecto: Transición hacia un Sistema Integrado e Inteligente de Transporte Público en México (TranSIT)

TranSIT

Este documento fue financiado en el marco del proyecto de cooperación bilateral denominado “Transición hacia un Sistema Integrado e Inteligente de Transporte Público en México” (TranSIT) entre el Gobierno Federal Mexicano a través de la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) y el Gobierno de Alemania, a través de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, que trabaja por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania. El objetivo del proyecto es mejorar la calidad y eficiencia del transporte público en México a nivel nacional y subnacional, a través de tres ejes temáticos: (1) desarrollo de instrumentos de toma de decisión, (2) diseño e implementación de proyectos demostrativos, e (3) intercambio de conocimientos y experiencias en temas relacionados con la movilidad.

Primera edición: febrero 2026

Publicado por:
Deutsche Gesellschaft für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
Dag- Hammarskjöld- Weg 1 - 5
65760 Eschborn, Alemania
T +49 61 96 79 -0
F +49 61 96 79-11 15
E info@giz.de
I www.giz.de

Agencia de la GIZ en México
Torre Hemicor, PH, Av. Insurgentes Sur 826,
Col. Del Valle, Juárez, 03100
Ciudad de México, México
T +52 55 55 36 23 44
E giz-mexiko@giz.de
I https://www.giz.de/en/worldwide/33041.html

Proyecto:
Transición hacia un Sistema Integrado e Inteligente del Transporte Público en México (TranSIT) de la Cooperación Técnica Alemana (GIZ) México

Agencia de Transporte de Yucatán (ATY)
Jacinto Sosa Novelo
Director de Agencia de Transporte de Yucatán

Cooperación Técnica Alemana (GIZ) en México
Isabel von Griesheim
Directora del Proyecto TranSIT

Andrés Rojo Maurer
Asesor Técnico en GIZ México

Angélica Lara Torres
Asesora Técnica Jr. en GIZ México

Neimy Girón
Asesora Técnica en GIZ México

Diseño editorial e ilustraciones:
LAGUNA · lagunadentro.com

Fotografía de portada:
GIZ

Fotos al interior del documento:
© GIZ / Ivonne Arceo

Derechos de autor:
Se permite la reproducción, total o parcial, por razones educacionales o sin ánimo de lucro de esta publicación, sin la autorización especial del portador de los derechos de autor, siempre y cuando la fuente sea citada.

Deslinde de responsabilidad:
Los hallazgos, interpretaciones y conclusiones expresadas en este documento están basados en la metodología y recopilación de insumos facilitadores por la GIZ México y sus consultores. No obstante, GIZ México no puede ser responsable del contenido de este documento ni garantiza la precisión o integridad de la información por errores, omisiones o pérdidas que surjan de su uso.

Forma de citar:
GIZ (2025). Me-mueve, asesoría para reforzar proyectos de buses eléctricos

Por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania.

CRÉDITOS Y AGRADECIMIENTOS

Este documento ha sido realizado gracias al apoyo de las siguientes organizaciones, dependencias y personas.

Participación y ejecución de me-mueve

Consultor independiente
Parménides Canseco Hernández
Experto en movilidad

E-mobilitas
José María Jiménez
Experto en energía

Agencia de Transporte de Yucatán
Dirección de electromovilidad y proyectos especiales



PREÁMBULO

En el marco del proyecto TranSIT se llevaron a cabo varios procesos de asesoría para evaluar y fortalecer los proyectos de electromovilidad en la ciudad de Mérida.

El propósito de dicho acompañamiento fue evaluar la factibilidad de introducir autobuses eléctricos adicionales, así como examinar la infraestructura de carga existente. En este documento se presentan recomendaciones generales destinadas a optimizar el desarrollo y la implementación de proyectos de autobuses eléctricos. Además, se ofrece una metodología para evaluar las rutas más adecuadas para la introducción de autobuses eléctricos. Por último, se incluye una hoja de ruta para el desarrollo de un proyecto de centro de carga.

Andrés Rojo Maurer
Asesor técnico en movilidad y transporte público
Cooperación Técnica Alemana (GIZ) en México

ÍNDICE

CRÉDITOS Y AGRADECIMIENTOS 3

PREÁMBULO 4

ME-MUEVE 8

Contexto 8
Descripción de la asesoría 8
Principales beneficios 9
Siguientes pasos 10

1 INTRODUCCIÓN 11

2 CONSIDERACIONES PARA PROYECTOS DE ELECTROMOVILIDAD 13

Autonomía y capacidad de energía 14
Estrategia de carga 17

3 PRIORIZACIÓN DE RUTAS A ELECTRIFICAR 19

Metodología 20

4 HOJA DE RUTA PARA HABILITACIÓN DE PATIOS DE RECARGA 32

Definición de lineamientos técnicos para la carga de autobuses eléctricos 37

5 RECOMENDACIONES 44

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 47

me-mueve

INFORMACIÓN GENERAL	
Estado	Yucatán
Periodo	Junio de 2023 a diciembre de 2025
Contraparte	Agencia de Transporte de Yucatán (ATY)
Objetivo	Reforzar proyectos de autobuses eléctricos sistema de transporte público de la ciudad de Mérida

EJES TRANSVERSALES

- **Digitalización**
- **Electromovilidad**
- **Financiamiento sostenible**

Contexto

Durante el periodo gubernamental 2018–2024, el Gobierno del Estado de Yucatán promovió la incorporación de autobuses eléctricos en el sistema de transporte público de la ciudad de Mérida. Este proceso se emprendió inicialmente a través del Instituto de Movilidad y Desarrollo Urbano Territorial (IMDUT) y, posteriormente, continuó bajo la dirección de la Agencia de Transporte de Yucatán (ATY), en su calidad de autoridad responsable de la planificación y operación del sistema, tras la conformación de la misma.

La implementación de la tecnología de movilidad eléctrica en el transporte público se presenta como una respuesta a una serie de necesidades y objetivos, entre los que se incluyen el requerimiento de conectar a las estaciones del Tren Maya con el centro de la ciudad, la modernización del transporte público y la reducción de los impactos ambientales en el sureste del país.

Descripción de la asesoría

Tras la introducción de dichas rutas de buses eléctricos, el proyecto TranSIT colaboró con la ATY con el objetivo de fortalecer la operación de los proyectos de autobuses eléctricos en la ciudad de Mérida, así como mejorar el diseño de nuevos proyectos de autobuses eléctricos.

En específico, el acompañamiento se enfocó en la revisión de la infraestructura eléctrica existente en el centro de carga; la mejora de los procedimientos internos de planificación y operación; y la evaluación de la viabilidad técnica y económica asociada a la incorporación de unidades adicionales de autobuses eléctricos. De forma complementaria, se analizó el proyecto de electrificación de rutas nocturnas, incluyendo la identificación de los puntos de carga más adecuados y la evaluación de su viabilidad técnica. Se buscó poner un foco especial en la sustentabilidad financiera en los proyectos de electromovilidad, para evitar la repetición de áreas de oportunidad detectada en proyectos previos.

Como parte de esta asesoría se definieron criterios técnicos básicos para el desarrollo de proyectos de electromovilidad, con el fin de anticipar posibles riesgos operativos y evitar complicaciones durante las etapas de planificación, inversión e implementación. Por consiguiente, se elaboró una hoja de ruta para la habilitación de patios de recarga, orientada a apoyar la toma de decisiones institucionales.

En una asesoría posterior, se llevó a cabo una revisión técnica de las instalaciones eléctricas del centro de carga ubicado en el CETRAM La Plancha. Como resultado de esta revisión derivaron recomendaciones para mejorar algunos elementos de cableado y otras protecciones eléctricas, en cumplimiento con la normativa nacional aplicable. Adicionalmente, se desarrolló una propuesta para la subcontratación de la operación y el mantenimiento del centro de carga a una empresa especializada en este ámbito.

Finalmente, se proporcionaron documentos de referencia para el desarrollo de lineamientos institucionales en materia de gestión y operación de autobuses eléctricos, así como una metodología para que la ATY pueda identificar y priorizar las rutas más adecuadas para la incorporación de nuevos autobuses eléctricos.

Paralelamente a este proceso de acompañamiento técnico, la ATY incorporó cuatro autobuses eléctricos articulados adicionales para el circuito periférico, alcanzando un total de 38 autobuses eléctricos en operación dentro del sistema de transporte público.

CONTRIBUCIONES

Reducción de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero (GyCEI)

Beneficios a la salud pública



Principales beneficios

La introducción de autobuses eléctricos en sistemas de transporte público urbano tiene el potencial de generar beneficios que trascienden el ámbito tecnológico y se reflejan en resultados ambientales, sociales y operativos relevantes para la gestión pública, tales como:

- **Reducción de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero (GyCEI).** La sustitución de autobuses con motor de diésel por unidades eléctricas incrementa la eficiencia energética del motor, lo cual abre la posibilidad de reducir las emisiones de GyCEI. Este beneficio es particularmente significativo cuando la electricidad utilizada proviene, total o parcialmente, de fuentes de energía renovables.

- **Beneficios a la salud pública.** Además de las emisiones de GyCEI, los motores de combustión interna generan gases contaminantes como óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), partículas en suspensión (PM), dióxido de azufre (SO_2), entre otros, los cuales tienen un impacto directo sobre la salud de la población. En este sentido, la transición hacia la utilización de eléctricos supone la eliminación de la emisión de gases contaminantes procedentes del escape del vehículo, lo que contribuye a la mejora de la calidad del aire en vías de alta demanda y en zonas urbanas densamente pobladas.

- **Reducción de la contaminación auditiva.** En contraste con los motores de combustión interna, los motores eléctricos operan con niveles de ruido significativamente inferiores. La implementación de esta tecnología en los corredores utilizados por autobuses resulta en una reducción significativa del ruido y la contaminación auditiva, lo que a su vez conlleva a una mejora en las condiciones de habitabilidad urbana.

Contribución a los objetivos de desarrollo sostenible (ODS):

La electrificación del transporte público contribuye directamente al cumplimiento del ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), al promover sistemas de movilidad más limpios, eficientes y accesibles, y del ODS 13 (Acción por el clima), al reducir las emisiones GyCEI asociadas a la red de transporte urbano. Desde la perspectiva de la política pública, este tipo de proyectos posibilita la articulación de las acciones locales y estatales con los compromisos nacionales e internacionales en materia de cambio climático y desarrollo sostenible.





Siguientes pasos

Tomando en consideración los resultados obtenidos en el proceso de asesoría, se han identificado una serie de acciones prioritarias orientadas a consolidar y optimizar la operación de los autobuses eléctricos, así como a fortalecer la toma de decisiones institucionales en futuras ampliaciones del sistema:

- Analizar el uso óptimo de las unidades de autobuses eléctricos.

  Si bien la incorporación de autobuses eléctricos resulta en beneficios significativos, su operación requiere de consideraciones particulares para garantizar un rendimiento óptimo, especialmente en lo concerniente a la autonomía de la batería y los tiempos de carga.

  Por lo tanto, se recomienda llevar a cabo un análisis que permita optimizar su utilización, considerando los tiempos de recarga y la vida útil de las baterías, con el fin de asegurar la continuidad del servicio y el aprovechamiento eficiente de la flota.



1 INTRODUCCIÓN

La transición hacia la electrificación del transporte público se perfila como un paso significativo en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, así como gases contaminantes locales y del ruido generado por los sistemas de transporte urbano.

En años recientes, diversas ciudades del país han manifestado un creciente interés en incrementar la flota de autobuses eléctricos de batería, tomando como referencia experiencias previas en ciudades como la Ciudad de México y Guadalajara.

En esta etapa clave de adopción de la tecnología, resulta fundamental que los proyectos de electrificación se estructuren de manera adecuada y se diseñen a partir de las condiciones específicas del sistema de transporte en el que se introducirán las unidades eléctricas.

La selección de las rutas, el diseño operativo y la planificación de la infraestructura de carga son elementos clave para poder asegurar un equilibrio entre los beneficios ambientales, la sustentabilidad financiera, y el beneficio social, mientras se moderniza el servicio del sistema de transporte público.

A pesar de que, en ciertos casos, el costo total de propiedad de nuevas unidades de batería eléctrica puede ser menor que el de los autobuses de diésel debido a menores costos de operación y mantenimiento, es importante señalar que el costo inicial de las unidades, y por lo tanto su costo de financiamiento, tiende a ser mayor.

La implementación de infraestructura de carga requiere una evaluación exhaustiva desde la perspectiva de la gestión pública. Un proyecto meticulosamente estructurado facilita la identificación de las rutas que satisfacen las condiciones apropiadas para la electrificación, contemplando la viabilidad de emplazar centros de carga a una distancia razonable de los trayectos, así como las características operativas de las rutas y las limitaciones presupuestarias del servicio. En consecuencia, se evidencia la posibilidad de mitigar las restricciones operativas inherentes a la autonomía de las baterías y la ubicación de los centros de carga.

En el presente documento se exponen consideraciones metodológicas y recomendaciones orientadas a respaldar la planificación y estructuración de proyectos de autobuses de batería eléctricos.





2 CONSIDERACIONES PARA PROYECTOS DE ELECTROMOVILIDAD

Este apartado aborda los factores que inciden en la viabilidad y eficiencia de los proyectos de electromovilidad en el contexto del transporte público. El propósito del análisis es brindar respaldo a la toma de decisiones desde la gestión pública, enfocándose en aspectos fundamentales que deben ser considerados, desde las etapas iniciales de planificación hasta la implementación del sistema.

Concretamente, se examinan factores asociados a la autonomía y la capacidad energética de los vehículos, la determinación de la estrategia de carga, la estimación del número de cargadores requeridos y la selección de las ubicaciones y espacios de resguardo. Estos elementos se encuentran interconectados, de manera que influyen directamente en la operatividad del servicio, la inversión requerida y la sostenibilidad del proyecto.

La estructura del apartado se ha organizado sistemáticamente de la siguiente manera:

1. Autonomía y capacidad de energía
2. Estrategia de carga
3. Estimación de la cantidad de cargadores necesarios
4. Ubicaciones y resguardo

Autonomía y capacidad de energía

Uno de los principales aspectos a considerar en un proyecto de electromovilidad es la autonomía de los vehículos, entendida como la distancia que un autobús puede recorrer con la energía disponible en sus baterías. Si bien los fabricantes proporcionan valores de autonomía estimados, para un servicio de transporte público es necesario realizar un análisis de dichos datos y ajustarlos a las condiciones reales de operación en cada sitio.

Esto se debe a que, en la práctica, no toda la energía disponible en la batería se destinará exclusivamente a la operación comercial del servicio. Se deben considerar "trayectos en vacío", es decir, los recorridos realizados sin pasajeros, como aquellos que se efectúan para trasladar las unidades hacia las bases, resguardos o puntos de carga. Cada uno de estos desplazamientos consume energía y reduce la autonomía disponible para el kilometraje comercial programado. Este aspecto cobra especial relevancia en modelos operativos que optimizan la flota durante las horas de menor demanda, lo que implica que los autobuses podrían regresar vacíos a sus bases o resguardos, o incluso realizar recorridos que se aparten de las rutas establecidas.

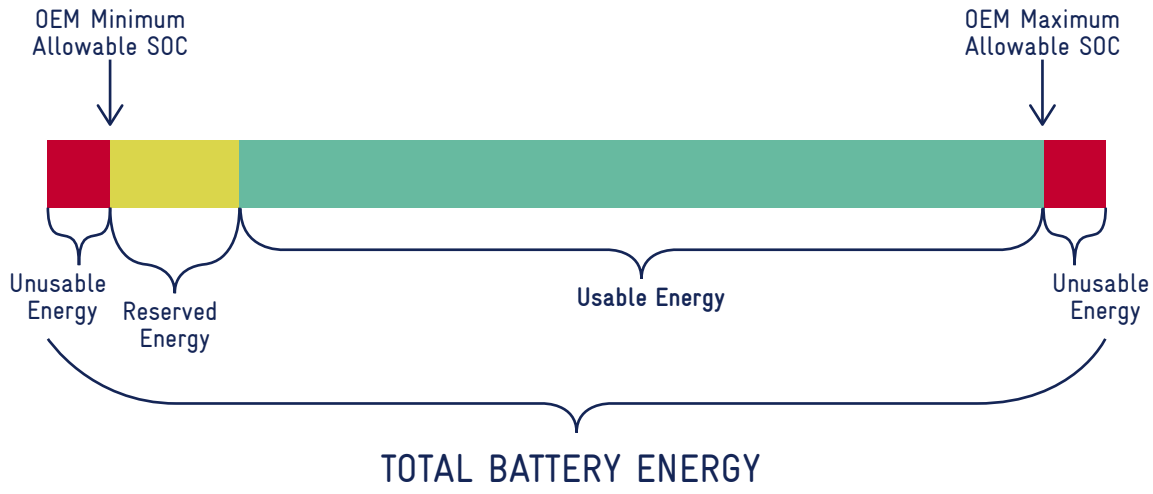
Esta situación puede ser aún más desafiante en instalaciones ubicadas lejos de los puntos de inicio o finalización de las rutas, ya que esto reduciría la autonomía disponible para el kilometraje comercial planificado.

Estado de carga

Otro elemento que es importante considerar en la gestión pública es el estado de carga de la batería (State of Charge, SoC), pues este nos indica la proporción de energía útil disponible para la operación de un autobús en un momento determinado, entonces, nos permite estimar con mayor precisión la autonomía real de las unidades en la operación diaria. En la práctica, la capacidad total de la batería indicada por el fabricante no se utiliza por completo, generalmente se reserva en el 15% y el 20% de la capacidad nominal de la batería como energía no utilizable. Este margen reduce la cantidad de energía disponible para el servicio, por lo que debe incorporarse en los análisis operativos y de planeación.

También es indispensable que el fabricante proporcione información específica sobre el porcentaje recomendado para su tecnología en particular, ya que sólo de esta forma se podrán realizar estimaciones realistas y evitar supuestos que afecten la operación del servicio.

Ilustración 1. Estado de carga, SoC.



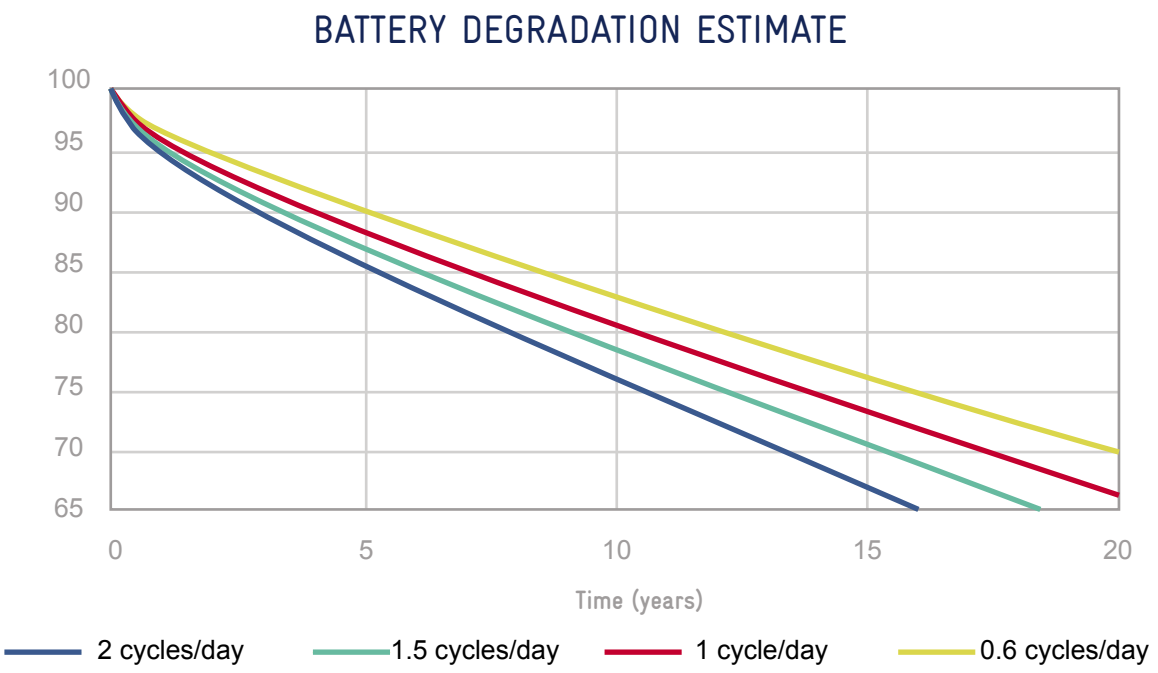
Fuente: Adaptado de: https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/76932.pdf

Reducción de la autonomía por degradación de la batería

A lo largo de su vida útil, las baterías experimentan un proceso gradual de degradación que reduce su capacidad de almacenamiento de energía, y por ende en la autonomía. Para contrarrestar el efecto de esta pérdida de capacidad, una práctica común es dimensionar las baterías considerando tanto esta pérdida de capacidad como la planificación operativa a futuro.

En consecuencia, al determinar la capacidad nominal de una batería nueva, se debe contemplar un margen que permita compensar la reducción progresiva de su desempeño. En general, **el porcentaje de degradación puede variar en un rango del 20% al 30% de su capacidad de almacenamiento, dependiendo de la vida útil prevista, la cual suele oscilar entre 6 y 8 años.**

Ilustración 2. Degradación de las baterías.



Fuente: Adaptado de: https://www.dnv.com/article/energy-storage-capacity-warranties-beyond-the-fine-print-200339

SoC y degradación

Cuando se analiza de manera conjunta el SoC y la degradación de la batería, es posible estimar con mayor precisión la capacidad de energía efectiva disponible para la operación del servicio. Por ejemplo, supongamos un escenario en donde se considere un SoC del 20% y una degradación del 20%, la capacidad de energía efectiva que tendría una batería se reduciría a aproximadamente el 60% de su capacidad nominal.

A partir de este dato, y considerando el consumo promedio por kilómetro, la autonomía resultante debería ser superior al kilometraje diario por autobús, con el fin de cumplir con la programación prevista. En caso de que la autonomía disponible sea inferior a la distancia diaria requerida, será necesario contemplar sesiones intermedias de recarga durante la jornada de operación, particularmente en las rutas que recorren distancias mayores.

Nota: Es importante considerar que la reducción de la capacidad de almacenamiento de energía de las baterías puede acelerarse si se utiliza una mayor potencia de carga y del número de cargas diarias.

Frenado regenerativo

La autonomía de los buses eléctricos se puede incrementar en función de su capacidad para regenerar energía mediante el frenado regenerativo. Este mecanismo permite aprovechar parte de la energía generada durante las desaceleraciones y frenadas para recargar parcialmente la batería. Su efectividad depende tanto de las condiciones de manejo, como de las especificaciones del fabricante.

Estrategia de carga

Definir una estrategia de carga adecuada requiere del desarrollo de planes de carga específicos para cada ruta y para cada autobús. Estos planes permiten establecer con mayor precisión la logística asociada al uso de los cargadores, así como la asignación de posiciones en patios y áreas de resguardo.

Como resultado del análisis de la autonomía disponible, una vez considerados el SoC y degradación de las baterías, es posible identificar buses que requerirán de dos o más sesiones de carga durante la jornada, debido a que la capacidad de la batería no será suficiente para cubrir el kilometraje promedio diario.

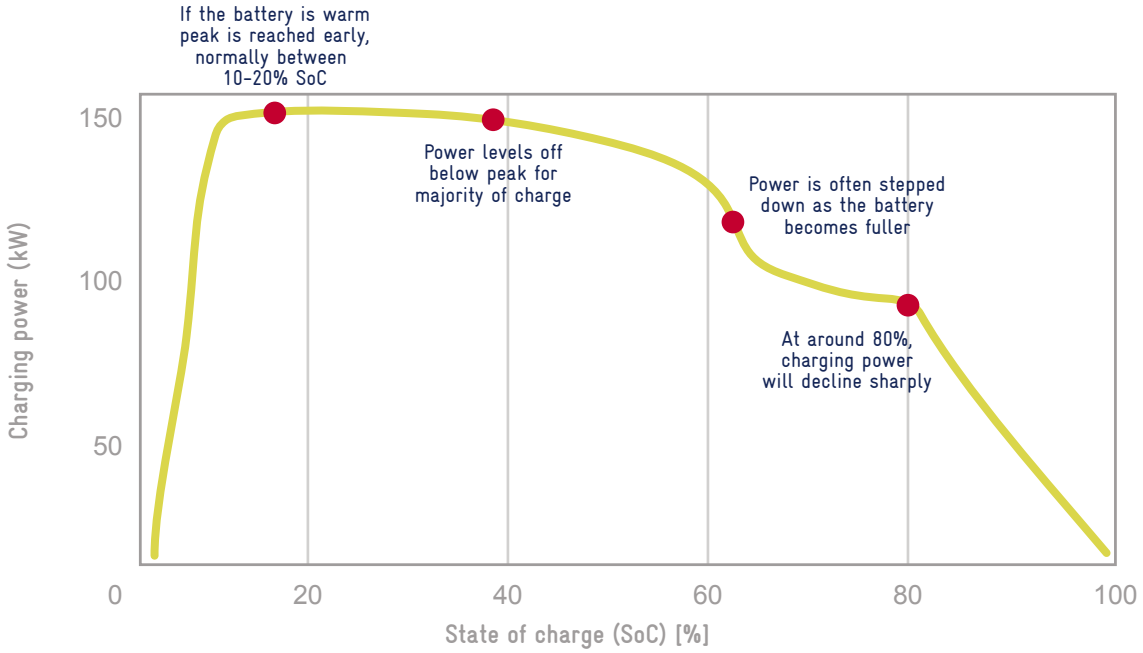
En estos casos, el autobús deberá interrumpir su operación para dirigirse a una estación de carga o a un patio de recarga, a fin de completar la energía necesaria para reincorporarse al servicio. Cuando no sea indispensable que la unidad retome la operación de manera inmediata, otro autobús con carga suficiente podría asumir el servicio. Sin embargo, esta opción puede implicar un incremento en el tamaño de la flota, y en consecuencia un aumento de costos asociados a inversión y operación.

Es importante resaltar que un mayor número de recorridos y de ciclos de cargas diarios puede acelerar el proceso de degradación de las baterías, reduciendo su capacidad de almacenamiento y afectando su estado de salud. Si además la potencia de carga es elevada, la degradación podría ser aún más rápida y pronunciada, lo que a su vez reduciría la vida útil de las baterías.

Tiempos de carga

El tiempo de carga de cada autobús depende del sistema de gestión de carga y de la potencia real de carga, la cual, entre otros factores, está influenciada por el SoC de la batería al inicio del proceso. Es por ello por lo que el tiempo de recarga varía entre unidades y jornadas de servicio.

Ilustración 3. Entrega de potencia de cargadores



Fuente: Adaptado de: https://www.gridserve.com/2023/02/17/what-is-an-electric-car-charging-curve/

Para definir con mayor precisión la estrategia de carga se recomienda considerar no solo el tiempo que toma la transferencia de energía, sino también las actividades que afectan la disponibilidad del espacio de carga aun cuando el cargador no esté en uso. En concreto, hay que considerar actividades tales como las maniobras de posicionamiento en el espacio del cargador, la conexión del cargador y su puesta en marcha.

En este sentido, el uso de cargadores de menor potencia puede permitir aumentar la cantidad de plazas de carga disponibles, disminuir la rotación de cargadores y, potencialmente, reducir los requerimientos de inversión y potencia eléctrica.

Estimación de la cantidad de cargadores necesarios

La estimación de la cantidad de cargadores o conectores requeridos depende de múltiples factores operativos, entre los más importantes se encuentran: el tiempo de carga disponible, conocido también como ventana de carga, el tiempo durante el cual cada autobús ocupa el espacio de carga y el tamaño total de la flota. Al considerar estos factores, es posible estimar tanto la cantidad de conectores requeridos como el ratio de uso por jornada, expresado como la relación entre autobuses y conector.

Además de considerar la rotación de los cargadores, se requiere una planeación logística para garantizar que todos los autobuses tengan el tiempo suficiente para la carga de las baterías.

Ubicaciones y resguardos

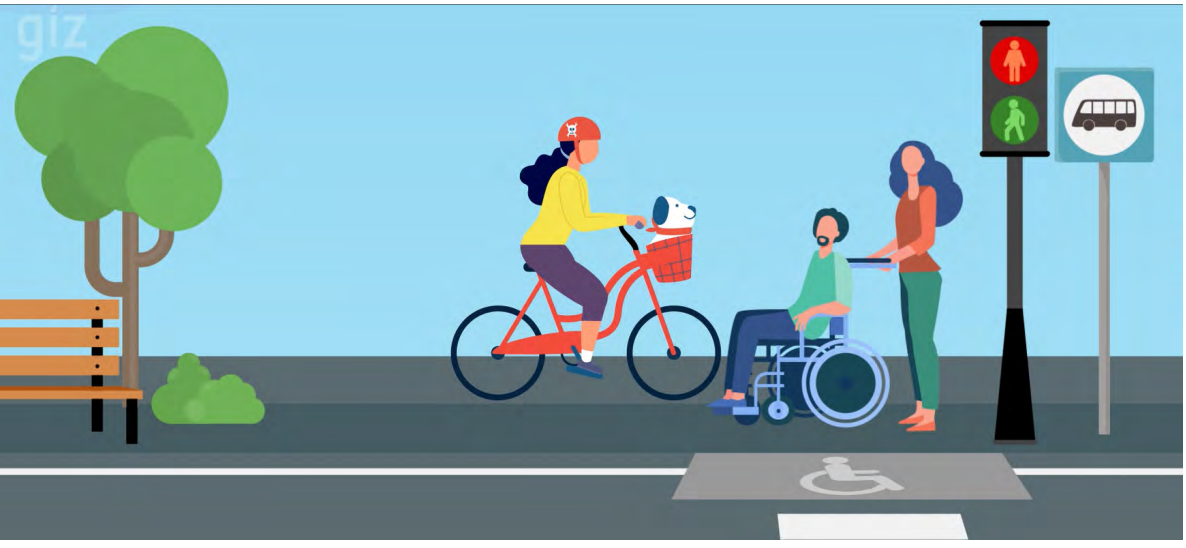
Durante los periodos de carga, los espacios destinados a la carga y al resguardo deben tener la capacidad de albergar a todos los autobuses que conforman la flota de las rutas analizadas, ya sea mientras se encuentran en proceso de recarga o cuando no se encuentran en operación.

Para determinar el impacto de las ubicaciones sobre la autonomía de las unidades, es necesario distribuir los autobuses en función de la capacidad de cada instalación y de su relación con las rutas correspondientes, con el fin de minimizar la distancia recorrida en trayectos no comerciales, los cuales consumen energía y reducen la autonomía disponible para la prestación del servicio.

Estimación del número de plazas por ubicación

La cantidad máxima de plazas de carga o estacionamiento disponibles en un sitio depende, en gran medida, de las restricciones propias de cada ubicación. Entre los factores que influyen se encuentra el uso compartido del espacio con otros vehículos, ya sean particulares o de otras tecnologías, la cantidad y disposición de accesos y salidas, así como la forma del y dimensiones del predio, que determinarán la disponibilidad de circulaciones o espacios.

Para un planteamiento realista, además de la forma del predio, es necesario considerar las instalaciones asociadas a los equipos eléctricos, así como las áreas destinadas al personal conductor, tales como baños, espacios de espera, cafetería y estacionamiento para personal, además de las instalaciones administrativas, entre otras. Estos elementos reducen la superficie disponible, y por tanto, la cantidad de posiciones que pueden habilitarse para los buses.





3 PRIORIZACIÓN DE RUTAS A ELECTRIFICAR

La transición hacia sistemas de transporte público electrificado desempeña un papel fundamental en la adopción de soluciones más sostenibles y responsables con el medio ambiente. La electrificación de las rutas de transporte público contribuye a la reducción de emisiones contaminantes y, al mismo tiempo, promueve una mayor eficiencia energética y la incorporación de innovación tecnológica en los sistemas de movilidad urbana. Sin embargo, dada la diversidad de rutas existentes y la limitación de recursos disponibles, es necesario contar con una metodología efectiva que permita priorizar de manera estratégica aquellas en donde la electrificación genere el mayor impacto positivo.

A continuación, se presenta una metodología para la priorización de electrificación de rutas de transporte público, basada en un enfoque multicriterio que permite identificar las rutas más viables y beneficiosas. La propuesta combina la metodología de jerarquía analítica (Analytic Hierarchy Process, AHP) con un proceso estructurado de aplicación, con el fin de establecer un marco robusto que permita a las autoridades de transporte y planificación tomar decisiones informadas y eficientes.

El desarrollo de la metodología se organiza en dos apartados:

(i). Metodología: en donde se incluye la definición del objetivo, los pasos a seguir y el modelo jerárquico con los criterios a evaluar para cada ruta.

(ii). Aplicación del método AHP: utilizado como la herramienta principal para la toma de decisiones multicriterio, a partir de la descomposición de los criterios en subcriterios y la comparación sistemática de las alternativas, lo que permite obtener ponderaciones coherentes para cada una de las variables analizadas.

Metodología

La metodología de priorización se fundamenta en la selección de un conjunto de variables y categorías de carácter principalmente técnico, las cuales resultan determinantes en el proceso de toma de decisiones relacionadas con la electrificación del transporte público. Estas variables permiten analizar de manera estructurada las condiciones y características de cada ruta, con el objetivo de evaluar su viabilidad en la incorporación de autobuses eléctricos.

Una vez definidas las variables, se asignan pesos relativos a cada una de ellas en función de su importancia en la consecución del objetivo de electrificación.

Este ejercicio de ponderación, realizado de manera colaborativa, permite jerarquizar las rutas mediante la generación de un ranking. De esta forma, la metodología propuesta se conforma como una herramienta efectiva para identificar con claridad aquellas rutas de transporte público que presentan el mayor potencial para ser electrificadas, simplificando y transparentando la toma de decisiones por parte de las autoridades responsables.

Ilustración 4. Metodología general



Fuente: elaboración propia.

Diseño del modelo jerárquico

Condicionantes de inicio

Antes de evaluar los criterios de cada ruta, se aplican una serie de filtros iniciales cuyo objetivo es descartar aquellas rutas que presentan obstáculos significativos para su electrificación. Estos condicionantes permiten enfocar el análisis en las rutas que, desde una primera revisión, son más viables y adecuadas para el proceso de electrificación.

A continuación, se presentan algunos ejemplos de estos filtros iniciales:

1. **¿El kilometraje diario recorrido por autobús es mayor a 350 km?**

   Cuando el kilometraje diario supera este valor, la ruta se descarta para la evaluación, debido a consideraciones relacionadas con la autonomía, así como los costos y el peso asociados a la tecnología.

2. **¿La velocidad de operación promedio es mayor a 25 km/h?**

   Si la velocidad promedio es superior a este rango, la ruta se descarta, ya que se estiman consumos energéticos mayores en comparación con rutas que operan a velocidades más bajas.

3. **¿El CAPEX de la ruta se encuentra dentro del techo presupuestal?**

   En caso de que el costo de inversión requerido exceda el presupuesto disponible, la ruta se descarta para la evaluación, dado que sobrepasar el techo presupuestal puede tener consecuencias negativas, como riesgos financieros, o requerir la reasignación de recursos de otras áreas críticas.

4. **¿La alternativa tecnológica deseada es compatible con la infraestructura y estándares de carga existentes?**

   Si no es compatible no es compatible, la ruta se descarta para la evaluación, ya que la incompatibilidad puede derivar en costos adicionales

significativos y obstáculos técnicos para la implementación del proyecto.

Modelo jerárquico

El modelo jerárquico propuesto se estructura en cuatro categorías que reflejan de manera integral tanto las condiciones actuales de las rutas como sus proyecciones futuras, considerando distintos escenarios hipotéticos de electrificación. Estas categorías facilitan un análisis equilibrado entre impactos sociales, condiciones operativas, alternativas tecnológicas y viabilidad económica.

1. **Beneficios generales.** Esta categoría se enfoca en evaluar el impacto general de la electrificación del transporte público en la población que habita la habita la cuenca de servicio de cada ruta, considerando los beneficios asociados a la mejora del servicio y a la reducción de impactos ambientales.

2. **Características actuales de la ruta.** En esta categoría se analizan las condiciones operativas existentes de las rutas de autobús, incluyendo la calidad del pavimento por el que circulan, el índice pasajero-km como indicador de la demanda de transporte y la distancia a la infraestructura de carga.

3. **Alternativa tecnológica.** Esta categoría se orienta a la evaluación de las opciones tecnológicas disponibles para la electrificación. Entre los indicadores considerados se encuentra la cantidad de cargas requeridas por jornada, el cual es un indicador clave para determinar la eficiencia y capacidad de las tecnologías elegidas para satisfacer la demanda de energética de la operación.

4. **Inversiones y costo.** Esta categoría considera los aspectos económicos del proyecto, en particular el CAPEX (costo de capital) asociado a la electrificación de cada ruta. La evaluación financiera proporciona información relevante para la planificación presupuestaria y la viabilidad a largo plazo de la implementación.

Ilustración 5. Modelo jerárquico de dos niveles.



Fuente: elaboración propia.

Descripción de categorías y variables

En esta sección se presentan las descripciones de las variables seleccionadas para la metodología de priorización. Las variables se encuentran agrupadas de acuerdo con la categoría a la que pertenecen, con el fin de facilitar su comprensión y su análisis dentro del modelo jerárquico.

Beneficios generales

Tabla 1. Población que habita la cuenca de servicio

NO. 1	VARIABLE: POBLACIÓN QUE HABITA LA CUENCA DE SERVICIO
Descripción	**Relevancia**
Cantidad de personas que habitan a una distancia de hasta 1 km del trazo de la ruta	Las rutas que atienden a una mayor población dentro de su cuenca de servicio tienen una mayor prioridad para la electrificación, debido al mayor impacto potencial sobre la población beneficiada.
Unidades	**Método de cálculo**
Número de habitantes	Estimación mediante un sistema de información geográfica de la población total que habita dentro de una cuenca de 1,000 m alrededor del trazo de la ruta de transporte público (500 m a cada lado del eje).
Insumos requeridos	
• Capa de población por Área Geoestadística Básica (AGEB) o manzana (INEGI) • Trazo de la ruta	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Porcentaje de circulación por áreas críticas

NO. 2	VARIABLE: PORCENTAJE DE CIRCULACIÓN POR ÁREAS CRÍTICAS
Descripción	**Relevancia**
Porcentaje del trazo de la ruta que circula dentro de áreas consideradas como críticas.	Las áreas críticas corresponden a zonas con mayor densidad de población, comercio, equipamientos u otros elementos de relevancia urbana, como centros históricos. Se da prioridad a aquellas rutas que circulan en mayor proporción por este tipo de áreas, debido al mayor impacto potencial de la electrificación.
Unidades	**Método de cálculo**
Porcentaje (%)	Estimación mediante un sistema de información geográfica del porcentaje de la ruta (en kilómetros) que transcurre dentro de zonas críticas previamente establecidas.
Insumos requeridos	
• Definición de zonas críticas • Trazo de la ruta	

Fuente: elaboración propia.

Características actuales de la ruta

Tabla 3. Condiciones del pavimento

NO. 3	VARIABLE: CONDICIONES DEL PAVIMENTO
Descripción	**Relevancia**
Valoración cualitativa de las condiciones físicas del pavimento a lo largo del trayecto de cada ruta.	Las ruta que cuentan con pavimento en mejores condiciones permiten una operación más eficiente de los vehículos eléctricos y pueden contribuir a menores costos de mantenimiento y desgaste de las unidades,
Unidades	**Método de cálculo**
Cualitativa: muy malo, malo, regular, bueno y muy bueno	Valoración cualitativa del estado del pavimento a partir de la observación y/o conocimiento del recorrido de la ruta.
Insumos requeridos	
• Capa con la valoración del estado del pavimento • Trazo de la ruta	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Índice pasajero-kilómetro (IPK)

NO. 4	VARIABLE: ÍNDICE PASAJERO-KILÓMETRO (IPK)
Descripción	**Relevancia**
Relación entre la cantidad de pasajeros transportados y los kilómetros recorridos durante un periodo determinado.	Las rutas con valores más altos de IPK reflejan un mejor aprovechamiento de la oferta de transporte en relación con la demanda, lo que las convierte en candidatas prioritarias para la electrificación.
Unidades	**Método de cálculo**
Pasajeros por kilómetro recorrido	Número de pasajeros transportados dividido entre los kilómetros recorridos por la ruta en el periodo de análisis.
Insumos requeridos	
• Número de pasajeros transportados • Kilómetros recorridos	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Distancia a la infraestructura de carga

NO. 5	VARIABLE: DISTANCIA A LA INFRAESTRUCTURA DE CARGA
Descripción	**Relevancia**
Distancia, en kilómetros, entre el patio de recarga y las terminales o cabeceras de la ruta.	Las rutas más cercanas a las zonas de carga, como terminales, cabeceras o patios con infraestructura de recarga, presentan una menor cantidad de kilómetros recorridos en vacío. Esto se traduce en menores costos de operación y mayores facilidades operacionales para las actividades de carga de baterías.
Unidades	**Método de cálculo**
Kilómetros	Estimación de la distancia lineal, en kilómetros, entre las cabeceras de la ruta (puntos de inicio y fin) y la ubicación propuesta de la infraestructura de carga.
Insumos requeridos	
• Capa con la ubicación de las zonas de carga • Trazo de la ruta	

Fuente: elaboración propia.

Alternativa tecnológica

Tabla 6. Cantidad de cargas por jornada

NO. 6	VARIABLE: CANTIDAD DE CARGAS POR JORNADA
Descripción	**Relevancia**
Cantidad de veces que un autobús debe ser recargado durante una jornada típica de operación.	Conforme aumenta la cantidad de cargas por jornada, la salud de las baterías tiende a reducirse debido al aumento en la cantidad de ciclos de carga. Adicionalmente, un mayor número de recargas requiere de una coordinación operativa más compleja para garantizar la disponibilidad de las unidades, lo que incrementa la complejidad logística de la operación.
Unidades	**Método de cálculo**
Número de cargas por jornada	Energía consumida durante la jornada dividida entre la capacidad de la batería.
Insumos requeridos	
• Capacidad de la batería propuesta (kWh) • Energía consumida durante la jornada de operación (kWh)	

Fuente: elaboración propia.

Costos de inversión

Tabla 7. Costo de capital de flota y cargadores

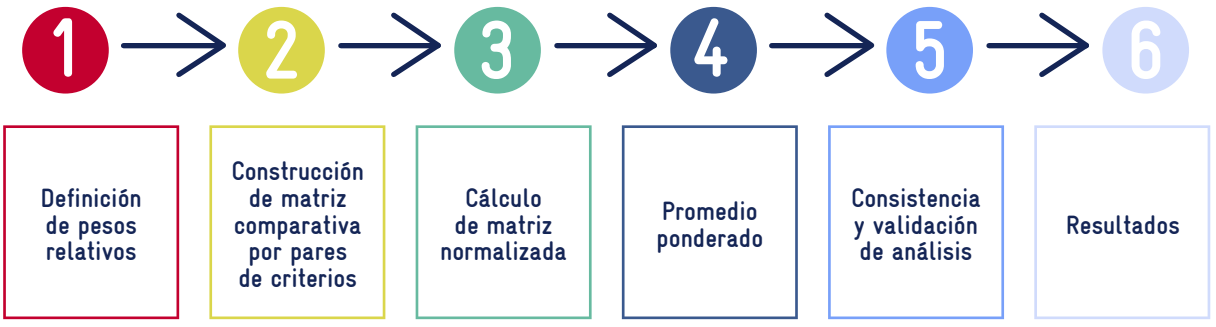
NO. 7	VARIABLE: CAPEX DE FLOTA Y CARGADORES
Descripción	**Relevancia**
Estimación general del monto de inversión inicial requerido para la adquisición de la flota de autobuses eléctricos y la infraestructura de carga asociada.	Las rutas que requieran menor inversión en flota e infraestructura de carga tendrán obtienen una mejor evaluación frente aquellas que son más intensivas en capital.
Unidades	**Método de cálculo**
Millones de pesos (MDP)	Suma del CAPEX correspondiente a la flota y del CAPEX asociado al equipo de carga.
Insumos requeridos	
• Estimación de la inversión en flota • Estimación de la inversión en equipo de carga	

Fuente: elaboración propia.

Método de análisis jerárquico (AHP)

El cálculo de los pesos asignados a cada variable se realiza mediante un proceso de comparación por pares, en el que se establecen prioridades relativas utilizando una escala cualitativa. Este procedimiento se fundamenta en el método AHP, el cual forma parte de las metodologías de análisis multicriterio empleadas para apoyar la toma de decisiones complejas.

Ilustración 6. Método de análisis jerárquico



Fuente: elaboración propia con información de (Bruno, 2006)

Pesos relativos

El proceso para determinar la ponderación de las variables comienza con la asignación de pesos relativos que reflejan su nivel de importancia dentro del modelo de priorización. Esta asignación se realiza de manera colaborativa, a partir del intercambio con personas tomadoras de decisiones o con personas expertas en el campo correspondiente, lo que permite incorporar criterios técnicos y de función pública.

Para apoyar este proceso, el uso de herramientas de acceso gratuito y de código abierto, como *Super Decisions*, resulta útil para identificar posibles inconsistencias en la asignación de pesos que podrían influir en la ponderación. Entre los principios que se revisan mediante este tipo de herramientas se encuentran los siguientes:

- **Linealidad o transitividad:** "Si A es mejor que B y B es mejor que C, entonces A debe ser mejor que C".
- **Proporcionalidad:** "Si A es muy preferible a B y B supera moderadamente a C, entonces A es extremadamente preferible respecto a C".

Este proceso sistemático contribuye a asegurar la consistencia interna de las ponderaciones asignadas y, por lo tanto, a fortalecer la confiabilidad de los resultados obtenidos mediante la aplicación de esta metodología.

Comparación

Una vez que se han definido los pesos relativos de las variables, el siguiente paso consiste en la construcción de una matriz que refleje estas ponderaciones. Esta matriz constituye la base del análisis, ya que organiza de manera estructurada la información utilizada en el proceso de comparación.

La matriz de comparación nos permite visualizar las relaciones entre pares de variables, pues incorpora los valores asignados en cada comparación y sus valores inversos.

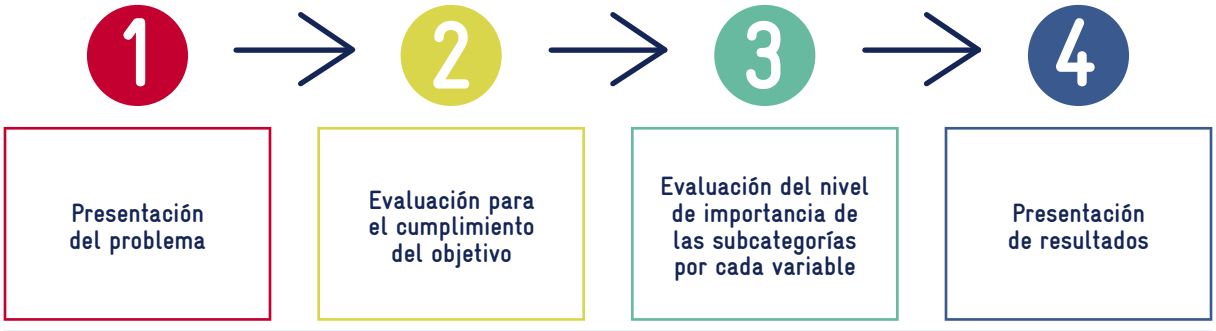
Aplicación del método AHP

Como se mencionó anteriormente, la obtención de la ponderación de las variables se realiza mediante el método AHP. Para ello, el primer paso

es el desarrollo y aplicación de un cuestionario, cuyo objetivo es identificar la relevancia relativa de cada variable dentro del proceso de priorización.

El cuestionario permite recopilar de forma sistemática la valoración de las variables por parte de las personas participantes y se estructura en cuatro apartados principales, los cuales se detallan a continuación.

Ilustración 7. Proceso de consulta a expertos y resultado

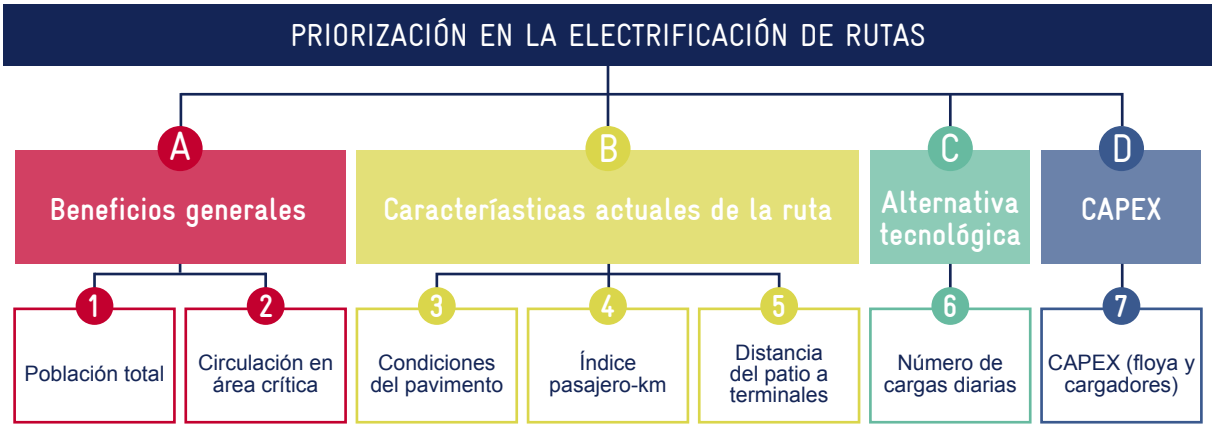


Fuente: elaboración propia.

1. **Presentación del problema.** En este apartado se presenta a la persona experta el objetivo de la encuesta y de la metodología, así como el modelo jerárquico.

2. **Evaluación para el cumplimiento del objetivo.** Con base en el modelo jerárquico, se evalúan las cuatro categorías principales definidas para el análisis.

Ilustración 8. Categorías evaluadas para el cumplimiento del objetivo



Fuente: elaboración propia.

Estas categorías presentan a la persona experta por pares, con el fin de que responda en las columnas **"¿Qué categoría considera que tiene más importancia?"** y **"Nivel de importancia"**, utilizando una escala cualitativa previamente definida.

Tabla 8. Nivel de importancia

NIVEL DE IMPORTANCIA
Igual de importante
Moderadamente más importante
Bastante más importante
Mucho más importante
Extremadamente más importante

Fuente: Elaboración propia.

Ejemplo de tabla:

Tabla 9. Evaluación del nivel de importancia por pares de categorías

CATEGORÍA 1	CATEGORÍA 2	¿Qué categoría considera que tiene más importancia?	NIVEL DE IMPORTANCIA
A. Beneficios generales	B. Características actuales de la ruta	A. Beneficios generales	Mucho más importante
A. Beneficios generales	C. Alternativa tecnológica	A. Beneficios generales	Mucho más importante
A. Beneficios generales	D. CAPEX	D. CAPEX	Igual de importante
B. Características actuales de la ruta	C. Alternativa tecnológica	C. Alternativa tecnológica	Igual de importante
B. Características actuales de la ruta	D. CAPEX	D. CAPEX	Extremadamente más importante
C. Alternativa tecnológica	D. CAPEX	D. CAPEX	Bastante más importante

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se presenta el índice de inconsistencia en un formato condicional, con el objetivo de que la persona experta pueda verificar que dicho índice no supere el umbral del 10% y, con ello, asegurar que la ponderación obtenida sea confiable.

Tabla 10. Indicador de inconsistencia en la encuesta

ÍNDICE DE INCONSISTENCIA	1.4%
Nota: el índice de inconsistencia debe ser inferior al 10%.	

Fuente: Elaboración propia.

3. **Evaluación del nivel de importancia de las subcategorías.** Finalmente, la persona experta deberá definir, dentro de cada categoría, el nivel de importancia de sus subcategorías. Esta evaluación no se realiza en aquellas categorías que cuentan con una sola subcategoría, ya que esta representa el 100% del peso de la categoría correspondiente.

Ilustración 9. Ejemplo de procesamiento de información dada por los expertos

		Condiciones demográficas	Condiciones ambientales C	Características de la ruta B	Desempeño B2	Rendimiento del autobús	Tipo de carga	Alimentación eléctrica	Suministro de energía	Propiedad de la tierra B3	Costo de capital
C1	Condiciones demográficas	1	1/9	1/5	1/6	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/5
C2	Condiciones ambientales	9	1	1/3	1/7	1/7	1/7	1/9	1/7	1/7	1/9
C3	Características de la ruta B	5	3	1	1/8	1/5	1/9	1/3	1/2	1/2	1/6
C4	Desempeño B2	6	7	8	1	1/5	1/7	1/5	1/5	1/3	1/5
C5	Rendimiento del autobús	7	7	5	5	1	1/7	1/9	1/3	1/5	1/3
C6	Tipo de carga	7	7	9	7	7	1	1/3	1/3	1/3	1/3
C7	Alimentación eléctrica A	7	9	3	5	9	3	1	1/5	1/5	1/3
C8	Suministro de energía	7	7	2	5	3	3	5	1	1/5	1/6
C9	Propiedad de la tierra	7	7	2	3	5	3	5	5	1	1/6
C10	Costo de capital	5	9	6	5	3	3	3	6	6	1

Fuente: elaboración propia.

Normalización y ponderación

Una vez asignados los valores por pares, las columnas de la matriz se normalizan de manera individual, de forma que la suma de cada una sea equivalente al 100%. Este paso permite estandarizar los valores y facilita la comparación entre variables.

Para calcular el peso final de cada variable, se suman los valores normalizados de cada fila, verificando que los resultados sean coherentes con los pesos relativos definidos previamente durante el proceso de comparación por pares. Finalmente, para determinar la ponderación global de todas las variables, la suma de las filas se normaliza en una escala de 0 a 1.

Ilustración 10. Ejemplo de obtención de matriz normalizada y peso ponderados

MATRIZ NORMALIZADA

		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10		
		Condiciones demográficas	Condiciones ambientales	Características de la ruta	Desempeño	Rendimiento del autobús	Tipo de carga	Alimentación eléctrica	Suministro de energía	Propiedad de la tierra	Costo de capital	Suma	**Ponderación**
C1	Condiciones demográficas	0.0164	0.0019	0.0055	0.0053	0.0050	0.0104	0.0094	0.0103	0.0158	0.0664	0.1464	**0.0146**
C2	Condiciones ambientales	0.1475	0.0175	0.0091	0.0045	0.0050	0.0104	0.0073	0.0103	0.0158	0.0369	0.2644	**0.0264**
C3	Características de la ruta	0.0820	0.0525	0.0274	0.0040	0.0070	0.0081	0.0219	0.0361	0.0552	0.0554	0.3495	**0.0350**
C4	Desempeño	0.0984	0.1226	0.2190	0.0318	0.0070	0.0104	0.0131	0.0144	0.0368	0.0664	0.6199	**0.0620**
C5	Rendimiento del autobús	0.1148	0.1226	0.1369	0.1591	0.0349	0.0104	0.0073	0.0241	0.0221	0.1107	0.7427	**0.0743**
C6	Tipo de carga	0.1148	0.1226	0.2464	0.2227	0.2440	0.0731	0.0219	0.0241	0.0368	0.1107	1.2169	**0.1217**
C7	Alimentación eléctrica	0.1148	0.1576	0.0821	0.1591	0.3137	0.2193	0.0657	0.0144	0.0221	0.1107	1.2594	**0.1259**
C8	Suministro de energía	0.1148	0.1226	0.0547	0.1591	0.1046	0.2193	0.3283	0.0722	0.0221	0.0554	1.2529	**0.1253**
C9	Propiedad de la tierra	0.1148	0.1226	0.0547	0.0954	0.1743	0.2193	0.3283	0.3609	0.1105	0.0554	1.6361	**0.1636**
C10	Costo de capital	0.0820	0.1576	0.1642	0.1591	0.1046	0.2193	0.1970	0.4331	0.6628	0.3321	2.5117	**0.2512**
	Suma	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	10.0000	**1.0000**

Fuente: elaboración propia.

Validación

Por último, es fundamental garantizar la coherencia de los resultados obtenidos, considerando los criterios previamente mencionados, como la transitividad y la proporcionalidad, para que las comparaciones sean lógicas y estén libres de contradicciones.

4. **Presentación de resultados.** El último paso del proceso consiste en la presentación de los resultados de la ponderación obtenidas a partir de las respuestas proporcionadas por la persona experta. Estos pesos son los que se utilizarán posteriormente para la evaluación y priorización de las rutas dentro del análisis.



4 HOJA DE RUTA PARA HABILITACIÓN DE PATIOS DE RECARGA

A continuación, se presenta una propuesta de hoja de ruta para la habilitación de instalaciones destinadas a la carga de autobuses eléctricos, estructurada en ocho fases interconectadas. Esta hoja de ruta tiene como objetivo identificar la etapa actual de desarrollo del proyecto y ofrecer una visión panorámica de su evolución a lo largo del tiempo.

Las fases consideradas abarcan desde la conceptualización del proyecto hasta la implementación del sistema de carga, permitiendo ordenar el proceso de forma progresiva y facilitar su seguimiento desde la gestión pública.

Ilustración 11. Fases de la hoja de ruta



IMAGEN 3. Fases de la hoja de ruta

Un elemento crítico para la implementación reside en aspectos organizacionales esenciales para una operación segura y eficiente. En este sentido, resulta prioritario fortalecer la formación y el establecimiento de la entidad operativa, considerando tanto sus aspectos legales y su estructura organizativa, como en la capacitación del personal. Estos elementos son clave para sincronizar la disponibilidad de los equipos y de la infraestructura con los recursos humanos administrativos y operativos requeridos para la puesta en marcha del sistema.

Tabla 11. Cronograma tipo

NO	FASE	MES									
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
1	Conceptualización del proyecto										
2	Planeación										
3	Gestiones										
4	Proyecto constructivo										
5	Adquisición de equipos										
6	Construcción de la obra civil										
7	Aspectos organizacionales										
8	Puesta en marcha										

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presenta la descripción de los principales componentes de cada una de las etapas, así como los elementos clave que deberán considerarse para su ejecución.

Fase 1. Conceptualización del proyecto

Descripción	Duración estimada
Esta fase se enfoca en la definición de los componentes fundamentales del proyecto. Durante esta etapa se evalúan posibles ubicaciones para las instalaciones de carga y se anticipan riesgos potenciales a partir de las características de los sitios analizados y las demandas operativas del servicio. Asimismo, en esta fase se exploran distintos modelos de organización y de negocio aplicables al proyecto. Por último, se destaca la identificación de los hitos críticos del proceso y su secuencia temporal, los cuales se integran en un cronograma general de implementación.	1 mes

Elementos clave
• Análisis preliminar de ubicaciones potenciales, incluyendo disponibilidad de suelo, proyectos conceptuales y análisis multicriterio. • Análisis de riesgos, tales como naturales, sociales, operacionales, entre otros. • Pre-dimensionamiento de los requerimientos de carga. • Análisis de disponibilidad de alimentación eléctrica, incluyendo acercamientos iniciales con la Comisión Federal de Electricidad (CFE). • Definición del modelo de Negocios. • Elaboración del cronograma general de implementación, con identificación de plazos y momentos críticos. • Gestiones para la adquisición o cesión de suelo.

Fase 2. Planeación

Descripción	Duración estimada
La etapa de planificación se enfoca en precisar los elementos operativos, de infraestructura y de equipamiento que servirán como insumos para la elaboración de un anteproyecto funcional, así como para la evaluación de las necesidades de inversión del proyecto.	2 meses

Elementos clave
• Definición de procedimientos y reglas operacionales, incluyendo accesos, inspecciones, lavado de unidades y reportes. • Diseño detallado de la operación por ruta y por vehículo, mediante hojas de cálculo o software especializado como Optibus o Goalbus. • Diseño del plan de carga de los autobuses utilizando hojas de cálculo o software especializado como Optibus o Goalbus. • Estimación del número de cargadores requeridos en función del plan operacional y de las condicionantes del sitio. • Estudio de las necesidades de obra electromecánica. • Estudios de mercado con proveedores de equipos de carga y equipos eléctricos. • Estimación de los requerimientos de potencia de alimentación eléctrica. • Definición del modelo de energía auxiliar, considerando opciones como redundancia, banco de baterías o plantas de emergencia. • Elaboración del proyecto arquitectónico, incluyendo planta de conjunto y señalización. • Estudio de movimientos interiores mediante software de análisis vehicular como AutoTrack o Vehicle Tracking. • Estudio de micro simulación de la operación con software especializado como PTV Vissim. • Estimación de los costos de inversión, operación, mantenimiento, así como del costo total de propiedad.

Fase 3. Gestiones con actores clave

Descripción	Duración estimada
Una vez que el proyecto ha sido precisado en términos de áreas, volúmenes y especificaciones técnicas, se cuenta con los elementos necesarios para iniciar las gestiones con los actores clave involucrados. Estos actores incluyen desde el proveedor de energía (CFE) hasta los transportistas, los gobiernos locales responsables del desarrollo urbano y de la protección civil, así como a la sociedad civil que podría verse impactada por el proyecto. Estas interacciones permiten incorporar consideraciones adicionales y, en su caso, definir medidas de mitigación que no hayan sido identificadas en etapas previas.	4 meses

Elementos clave

- Comisión Federal de Electricidad (CFE)
- Transportistas
- Gobiernos locales
- Sociedad civil

Fase 4. Elaboración del proyecto constructivo

Descripción	Duración estimada
La elaboración del proyecto constructivo estará condicionada por el modelo de negocios y gestión seleccionado. En este sentido, es fundamental considerar los plazos legales necesarios tanto para la generación interna del proyecto ejecutivo como para la posibilidad de contratar servicios externos. Asimismo, se debe considerar el proceso de licitación asociado a la obra civil.	2 meses

Elementos clave

Proceso de elaboración y validación del proyecto ejecutivo.

Elaboración de actividades preliminares a la licitación de la obra civil.

Proceso de licitación y adjudicación de la obra civil.

Fase 5. Adquisición de equipos

Descripción	Duración estimada
En continuidad con las fases previas, el proceso de adquisición de equipos, en particular los cargadores y los elementos eléctricos personalizados, se encuentra condicionado por el modelo de negocios seleccionado. Los plazos de entrega de estos equipos pueden incidir directamente sobre la planificación de la obra, y en consecuencia, con el inicio de la operación del servicio.	6 meses

Elementos clave

- Definición de las especificaciones técnicas de los cargadores y de los equipos eléctricos, ya sea con personal de la institución o con apoyo de consultores externos.
- Proceso de adquisición de los equipos, incluyendo licitación y adjudicación
- Plazos de fabricación de los equipos.
- Seguimiento al proceso de fabricación de los autobuses, por ejemplo, mediante visitas a la planta.
- Plazos para el traslado e importación de los equipos.
- Verificación del cumplimiento de las especificaciones solicitadas, como en el caso del autobús cabeza de serie.
- Habilitación del sitio de resguardo inicial de equipos y vehículos.
- Puesta en sitio de los equipos.

Fase 6. Construcción de la obra civil

Descripción	Duración estimada
Una vez concluida la adjudicación de la obra civil y avanzadas las gestiones administrativas hasta la firma de los contratos correspondientes, se cuenta con las condiciones necesarias para iniciar la ejecución de la construcción. La eficacia de esta fase está estrechamente vinculado a la llegada puntual de los equipos de carga y de los componentes eléctricos, al cumplimiento del cronograma establecido y a las adaptaciones requeridas que puedan requerirse para integrar de manera eficiente la red de suministro eléctrico.	2 meses

Elementos clave

- Construcción de la obra civil.
- Instalación de equipos.
- Obras de alimentación eléctrica.

Fase 7. Aspectos organizacionales

Descripción	Duración estimada
La definición de los aspectos organizacionales, incluidos los recursos materiales, técnicos y humanos, así como los procesos que necesarios para la puesta en marcha del servicio, resulta fundamental para la operación del sistema. Por ello, de forma paralela a la construcción de la obra civil, deben abordarse los aspectos legales relacionados con la conformación de la organización, así como la definición de su estructura y funcionamiento, además del proceso de contratación y capacitación del personal encargado de operar los patios de carga. En esta fase se pone especial énfasis en la capacitación para el uso adecuado de los equipos y en los aspectos de seguridad laboral, considerando los riesgos asociados al manejo de sistemas de alto voltaje.	6 meses

Elementos clave

- Aspectos legales y fiscales.
- Definición de la estructura organizacional.
- Elaboración de procesos administrativos, operativos y de seguridad.
- Proceso de contratación de personal.
- Capacitación en el manejo de los equipos y en seguridad en el trabajo.

Fase 8. Puesta en marcha del servicio

Descripción	Duración estimada
La puesta en marcha del patio de carga debe iniciar de manera conjunta con las pruebas preoperativas del servicio. Para ello, es indispensable contar con un plan exhaustivo de pruebas operativas que abarque diversos escenarios de operación. Este proceso permitirá realizar ajustes al plan de carga en función de los recursos y capacidades operativas identificadas durante las pruebas.	1 mes

Elementos clave

- Diseño del plan de pruebas preoperativas.
- Capacitación del personal involucrado en la operación.
- Ejecución de la fase de pruebas preoperativas.
- Ajustes a los planes operacionales y a la estrategia de carga con base en los resultados de las pruebas preoperativas.
- Puesta en marcha del servicio regular.

Definición de lineamientos técnicos para la carga de autobuses eléctricos

El objetivo principal de estos lineamientos técnicos es proporcionar una visión integral de los elementos esenciales necesarios para la implementación de patios de carga destinados a autobuses eléctricos de batería con el fin de informar y destacar los aspectos clave que deben considerarse durante las etapas de diseño, planificación y construcción de este tipo de instalaciones.

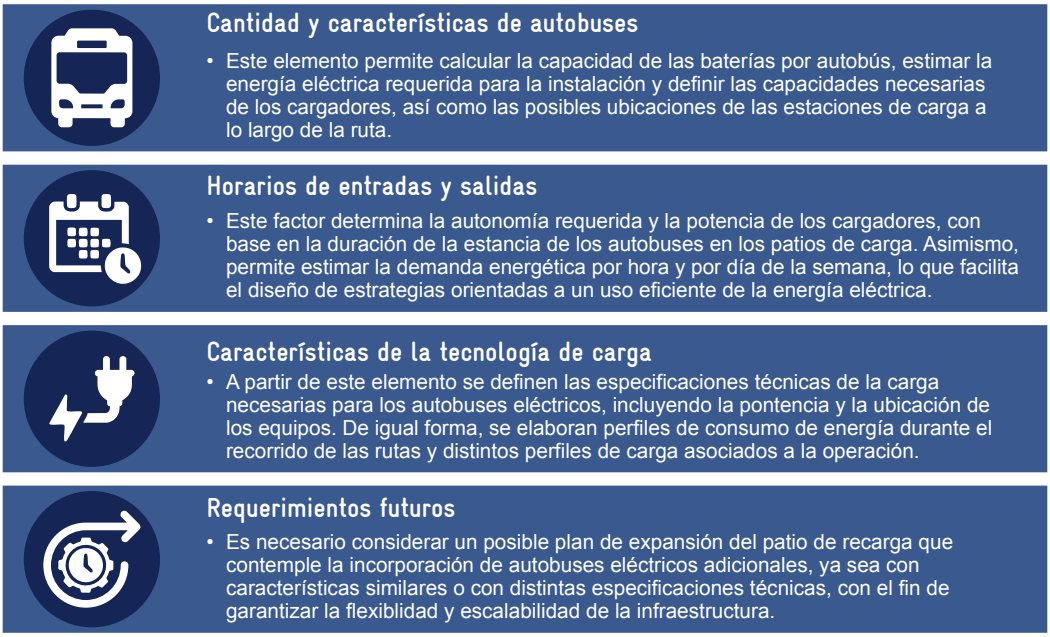
Este documento ha sido desarrollado a partir de la experiencia acumulada a nivel internacional, incorporando aprendizajes relevantes y poniendo especial atención en los avances alcanzados en la región, con el fin de contextualizar los lineamientos a las condiciones locales.

Componentes fundamentales

Los patios de carga se conciben para atender a autobuses eléctricos que operan en una o varias rutas urbanas. En este sentido, la planificación de las rutas constituye un paso previo al diseño de los patios de carga, ya que proporciona información indispensable para definir tanto la configuración del espacio como la ubicación de las instalaciones.

A partir de esta relación entre rutas y patios de carga, se hace patente considerar un conjunto de variables inciden directamente en el diseño y la operación de las instalaciones. Estas variables se describen y explican en los siguientes apartados.

Ilustración 12. Información fundamental para el desarrollo de un patio de carga eléctrico



Una vez recopilados estos datos, las personas expertas en transporte, energía y construcción podrán realizar cálculos para determinar los requisitos y especificaciones de un patio de recarga adecuado.

Además de los componentes estándar de un patio de autobuses, a continuación, se presentan los elementos clave que deben de considerarse de manera específica en un patio de carga para autobuses eléctricos de batería.

Localización

- **Abastecimiento de energía.** La disponibilidad de infraestructura eléctrica y suministro de energía por parte de la CFE debe encontrarse cercana al patio o sitio de carga para evitar costos elevados asociados a la extensión de la red eléctrica.

- **Cercanía al inicio y fin de las rutas.** Es importante considerar la proximidad del patio de carga respecto a los puntos de inicio y fin de las rutas para reducir los kilómetros recorridos en vacío.

- **Pendientes.** Los accesos al sitio no deben presentar pendientes superiores a las capacidades de diseño de los autobuses, En general, pendientes mayores a 20–25° pueden dificultar la operación de las unidades.

- **Inundaciones.** Se deben evitar zonas propensas a inundaciones, por lo que es necesario considerar estudios hidrológicos de la ciudad. Este aspecto resulta especialmente relevante, ya que los cargadores suelen alimentarse desde la parte inferior de sus gabinetes.

- **Requisitos futuros.** Deben contemplarse tanto los espacios necesarios para los autobuses como para los cargadores, el cuarto eléctrico y la infraestructura eléctrica que será instalada por la CFE, de la subestación hasta el patio de carga, con el objetivo de permitir la operación y posibles ampliaciones en el futuro.

Obra civil

- **Cuarto eléctrico.** En este espacio se alojan elementos como seccionadores de media tensión, transformadores, paneles de seguridad y sistemas de respaldo energético. Las dimensiones y el peso de estos equipos varían en función de la potencia requerida, y cada uno puede requerir cimientos específicos de acuerdo con las especificaciones de cada proveedor.

- **Cargadores.** La instalación de cargadores puede requerir refuerzos en la infraestructura existente, ya sea en superficies de suelo, techo o muros, dependiendo de la tecnología y potencia empleadas. Los fabricantes de cargadores ofrecen manuales de instalación que detallan directrices para una base sólida y enfatizan la importancia de una ventilación apropiada para garantizar un rendimiento óptimo.

- **Canalización eléctrica y de comunicación.** En el diseño de las canalizaciones, ya sean subterráneas o elevadas, deben considerarse las dimensiones adecuadas de los conductores eléctricos. En algunos casos, los cargadores requieren también conectividad para funciones de monitoreo o interconexión, lo que puede implicar la incorporación de canalizaciones adicionales. Los manuales de instalación de los fabricantes de cargadores proporcionan información detallada sobre los calibres y tipos de cables necesarios para asegurar un rendimiento óptimo.

- **Medidas de protección y señalización.** Es indispensable implementar medidas de protección física, como topes de estacionamiento y bolardos, que resguarden los cargadores, especialmente aquellos instalados a nivel del suelo. Además,

se debe colocarse señalización preventiva que advierta sobre los riesgos potenciales de descarga eléctrica, en particular en el cuarto eléctrico, los cargadores y en las zonas de recarga.

- **Autobuses.** Información como el peso del vehículo, su longitud, el radio de giro y la ubicación de la toma de carga en el autobús es fundamental para el diseño y construcción del patio de carga.

Obra electromecánica

- **Diseño y dimensionamiento de sistemas.** El diseño eléctrico de la infraestructura de carga para autobuses eléctricos se fundamenta en una estimación precisa de la energía necesaria para abastecer a los cargadores, de acuerdo con las características de la flota y la operación prevista.

  Es de suma importancia considerar la confiabilidad de la red eléctrica, incluida la posibilidad de incorporar esquemas de redundancia, al concebir la infraestructura de carga. Ante eventuales interrupciones del suministro eléctrico, debe integrarse un sistema de respaldo que garantice la operatividad de un número determinado de cargadores.

  De igual forma, al distribuir la carga eléctrica entre las distintas fases, resulta crucial considerar el esquema eléctrico de los cargadores para asegurar un equilibrio óptimo de las cargas.

- **Selección de equipos y materiales.** Dado que los cargadores para autobuses eléctricos son sistemas electrónicos de potencia, es de vital importancia elegir aquellos equipos que presenten bajos niveles de distorsión armónica. Aunado a ello, se recomienda la instalación de transformadores capaces de atenuar o, al menos, soportar los efectos térmicos asociados a las corrientes armónicas.

- **Instalación eléctrica.** En el diseño técnico de la infraestructura, la incorporación de un sistema de puesta a tierra confiable es esencial. De igual manera, deben considerarse las posibles futuras expansiones del sistema. También es necesario considerar las restricciones de distancia entre los módulos de potencia de los cargadores y las tomas de carga de los autobuses, conforme a las especificaciones del fabricante y al modelo del cargador.

- **Instalaciones mecánicas.** Aunado a la implementación de canalizaciones eléctricas, es indispensable contemplar la instalación de canalizaciones para los sistemas de comunicación, las cuales variarán según el tipo de cargador y su configuración eléctrica.

- **Integración de sistemas.** El análisis detallado de las especificaciones del cargador facilita la identificación precisa de los parámetros necesarios para establecer la infraestructura de comunicación. Esto comprende aspectos como la selección de cables adecuados, la compatibilidad de los protocolos de comunicación y las distancias máximas permitidas entre los distintos componentes del sistema.

Cargadores para vehículos eléctricos

Tipos de carga

- **Carga en patio**: La carga en patio es la modalidad de recarga más utilizada a nivel internacional para patios de resguardo. Consiste en conectar el cargador al autobús mediante una o dos mangueras con su respectivo conector. Estas mangueras pueden estar integradas al cargador, a un poste de carga o a un sistema retráctil instalado en el techo del patio, con el fin de optimizar el uso del espacio. Esta solución se emplea cuando la autonomía del autobús es su-

ficiente para cubrir la operación diaria de la ruta y cuando se dispone de tiempos de resguardo adecuados para realizar la recarga de las baterías durante varias horas. Las diferencias principales entre esta modalidad de carga y la carga de oportunidad se describen a continuación.

- Al concentrarse la estación de carga en un solo punto, se disminuye la cantidad de documentación y de permisos requeridos para el diseño y la construcción de la infraestructura de carga.

- Al ser un lugar en donde se recargan varios autobuses de manera simultánea, es posible incorporar sistemas de gestión de carga que permitan realizar cargas simultáneas y priorizar determinados vehículos. Esto contribuiría a optimizar el uso de energía disponible y a reducir los costos asociados al consumo energético y a infraestructura eléctrica requerida.

- Normalmente, estos patios de carga se utilizan por la noche para recargar las baterías de los autobuses. En consecuencia, los costos energéticos tienden a ser más bajos en comparación con otras modalidades de carga, debido a las tarifas eléctricas aplicables en horarios nocturnos.

Dado que la recarga se realiza mediante conectores, existe la posibilidad de utilizar adaptadores para cargar otros vehículos eléctricos, siempre que se lleven a cabo pruebas de interoperabilidad que garantice la compatibilidad y la seguridad de la operación.

- **Carga de oportunidad:** La carga de oportunidad consiste en la recarga de autobuses eléctricos en paradas específicas del trayecto, mediante el uso de cargadores tipo pantógrafo, los cuales permiten recargar un porcentaje significativo de la batería del autobús en pocos segundos. Esta modalidad de carga se utiliza principalmente para atender dos situaciones: por un lado, rutas cuya longitud supera la capacidad de autonomía de los autobuses eléctricos, y por otro, rutas de alta prioridad que requieren una operación continua las 24 horas del día, los siete días de la semana.

  Cuando se elige esta solución de carga se deben considerar los siguientes aspectos:

  - A mayor número de puntos de carga instalados a lo largo de la ruta, mayor será el costo total del proyecto, ya que cada punto implica actividades de diseño, construcción e instalación de infraestructura eléctrica.

  - Al ubicarse sobre la vía pública, los espacios disponibles suelen ser limitados. En algunos casos, la instalación eléctrica y los equipos asociados, como sistemas de protección, deben colocarse de manera subterránea, lo que puede incrementar los costos de implementación de estos puntos de carga.

  - Como se mencionó anteriormente, es necesario revisar la disponibilidad de energía, el tipo de voltaje en media tensión y la capacidad de la infraestructura eléctrica por parte de la CFE en cada uno de estos puntos de carga.

  - El costo de la energía, salvo que se cuente con alguna excepción, suele ser mayor cuando se utiliza durante horas pico, lo que incrementa los costos operativos asociados a esta modalidad de carga.

- **Tipo de conector.** En el contexto de la carga de autobuses eléctricos, los conectores juegan un

papel crucial, particularmente en los sistemas de carga mediante manguera. Estos dispositivos presentan un extremo que termina en un conector en forma de clavija o "enchufe", destinado para acoplarse al receptáculo correspondiente del vehículo.

Es importante destacar que, actualmente, no existe una regulación nacional en México que estandarice los tipos de conectores necesarios para vehículos eléctricos. En la práctica, los conectores más utilizados por los autobuses eléctricos son los de corriente directa, entre los que se encuentran el CCS1 (americano), CCS2 (europeo), GB/T (chino) y CHAdeMO (/internacional).

- **Interoperabilidad.** La interoperabilidad es de gran importancia en los patios de carga, especialmente cuando se contempla la expansión de autobuses o la posibilidad de abrir el patio a terceros a largo plazo. En el patio de carga la interoperabilidad se desglosa en cuatro secciones distintas:

- **Interoperabilidad física:** Esta sección se refiere al tipo de conector utilizado en los autobuses

- **Interoperabilidad entre el vehículo eléctrico y el cargador**: Es esencial asegurar una comunicación eficaz y de doble sentido entre el vehículo eléctrico y el cargador.

- Interoperabilidad entre el cargador y la red eléctrica. Esta dimensión permite reconocer y gestionar los requerimientos energéticos del patio de recarga, abarcando tanto incrementos como reducciones en la demanda eléctrica.

- **Interoperabilidad entre el cargador y el sistema de monitoreo.** Esta dimensión de la interoperabilidad se refiere a la conexión entre el cargador y un sistema de supervisión. Para ello, el cargador debe contar con el Protocolo Abierto de Punto de Carga (Open Charge Point Protocol, OCPP), el cual fue diseñado específicamente para facilitar esta función y permitir la gestión y el monitoreo de la operación de carga.

Seguridad

- **Marco normativo y regulatorio.** Las personas que operen patios de carga y autobuses eléctricos deben revisar y comprender de manera exhaustiva las políticas, leyes y regulaciones aplicables a los servicios de emergencia en el ámbito eléctrico y de los vehículos eléctricos, a nivel nacional, estatal y municipal.

- **Coordinación interinstitucional.** Se recomienda establecer mecanismos de colaboración con entidades relevantes, como los proveedores de servicios públicos, la CFE y los servicios de emergencia, con el objetivo de aprovechar las políticas, lineamientos y recomendaciones existentes en materia de seguridad y atención de incidentes.

Consideraciones para la operación y mantenimiento

La operación y el mantenimiento eficientes de un patio de carga para autobuses eléctricos juegan un rol fundamental para garantizar un funcionamiento confiable y sin interrupciones de la flota. La gestión de un patio de carga implica un enfoque integral que abarca diversos aspectos, entre ellos la administración de la infraestructura de carga, la planificación de los horarios de los vehículos, la distribución de la energía, los protocolos de seguridad y las consideraciones medioambientales.

En el centro de esta operación se encuentra la infraestructura de carga, la cual debe planificarse de

manera estratégica, administrase de forma eficiente y mantenerse adecuadamente para garantizar la disponibilidad de autobuses cargados y listos para su operación continua.

Mantenimiento

El mantenimiento del patio de carga de autobuses es de suma importancia para evitar interrupciones y asegurar la durabilidad tanto de los equipos de carga como de los propios autobuses. Las rutinas regulares de mantenimiento incluyen actividades como la inspección y el servicio de las estaciones de carga, el seguimiento de la salud de las baterías, la atención de problemas técnicos y la implementación de medidas preventivas para mitigar posibles fallas.

Los sistemas de carga empleados en estos entornos son equipos de alta tecnología, diseñados para operar con potencias superiores a 90 kW. Estos cargadores rápidos requieren un manejo especializado y el estricto cumplimiento de las indicaciones del fabricante.

Es esencial que el fabricante de los cargadores proporcione un calendario de mantenimiento detallado, así como una lista de los componentes y repuestos que deben sustituirse en intervalos específicos. El cumplimiento de este calendario, el uso de repuestos adecuados y la observancia de las recomendaciones del fabricante son acciones clave para garantizar el desempeño óptimo de los cargadores rápidos a lo largo de su vida útil.

Monitoreo

La incorporación de sistemas de monitoreo desde las etapas iniciales del proyecto genera beneficios significativos en el corto y mediano plazo. En un patio de carga, es posible supervisar diversas variables clave que apoyan la toma de decisiones operativas y la optimización del uso de la infraestructura.

Entre las principales variables que pueden monitorearse se encuentran las siguientes:

1. **Horarios de carga**. Registrar los horarios de carga permite optimizar el uso de la infraestructura de carga y aprovechar periodos de menor demanda eléctrica.

2. **Cantidad de energía requerida.** El monitoreo de la energía necesaria para cargar los autobuses proporciona información relevante para dimensionar adecuadamente la infraestructura de carga y asegurar una entrega de energía eficiente.

3. **Consumo de energía por autobús.** El seguimiento del consumo energético de cada autobús en su ruta permite identificar patrones de uso y realizar ajustes orientados a mejorar la eficiencia energética de la población.

4. **Estado de carga del autobús.** Supervisar el nivel de carga de cada autobús facilita una gestión efectiva de la programación de carga, previniendo sobrecargas o descargas insuficientes que puedan afectar el rendimiento y autonomía de los vehículos.

Con estos datos es viable optimizar el sistema de carga y establecer estrategias para reducir costos energéticos, tanto en función de los horarios de carga como del aprovechamiento de la capacidad instalada. Además, al combinar la información de monitoreo con datos del autobús y la ruta, pueden implementarse estrategias adicionales, como la programación de las cargas en función del SoC de cada autobús y de los requisitos particulares de la ruta.



5 RECOMENDACIONES

- **Optimización de rutas.**
  Antes de iniciar la electrificación del sistema, es fundamental explorar la posibilidad de optimizar las rutas de transporte público con el fin de reducir las necesidades de inversión en flota, en número de cargadores y en superficie requerida para la infraestructura. Realizar análisis detallados de intervalos, frecuencias y kilometraje permite alcanzar un equilibrio más eficiente entre la oferta y la demanda del servicio, maximizando la utilización de los autobuses y mejorando el desempeño general del sistema.

- **Indicadores de eficiencia.**
  Se recomienda evaluar la mejora de indicadores clave como IPK y pasajeros por autobús, al considerar la ampliación del intervalo de tiempo entre unidades.

- **Evaluar dónde priorizar la electrificación.**
  El modelo presentado proporciona un marco para la priorización de la inversión que considera factores clave como el beneficio a la población, el Índice de Pasajeros por Kilómetro (IPK), la distancia a los patios de recarga, el número de cargas por jornada y la evaluación financiera asociada (CAPEX). Este enfoque permite apoyar la toma de decisiones respecto a la asignación estratégica de recursos a rutas con potencial de electrificación, contribuyendo a reducir riesgos operativos y financieros a el futuro.

- **Capacidad adecuada.**
  Se considera importante hacer una evaluación de la ocupación de las rutas, y considerar la incorporación de autobuses con capacidad adecuada de pasajeros. Elegir autobuses de capacidad adecuada puede la disminuir los costos de operación, y la reducción del número de cargadores necesarios. Lo anterior debe analizarse considerando la factibilidad operativa en los patios de carga, particularmente en términos de superficie disponible, circulaciones internas y radios de giro, en función de las dimensiones y capacidades de las nuevas unidades.

- **Tecnología mixta en la flota.**
  En los proyectos de electrificación se recomienda evaluar la viabilidad de contar con flota combinada, integrada por autobuses eléctricos y unidades convencionales o híbridas. Este esquema puede contribuir a reducir los riesgos asociados a limitaciones de autonomía en los escenarios con alto kilometraje de operación diaria. Además, la coexistencia de flota eléctrica y convencional o híbrida, puede disminuir los requisitos de inversión tanto en la flota como en los equipos de carga.

- **Gestión de la autonomía.**
  Dado que la autonomía de los autobuses disminuye con el tiempo como resultado de la pérdida de capacidad asociada a la degradación de las baterías, es indispensable planificar soluciones para afrontar este fenómeno. Se sugiere considerar la implementación de cargas intermedias durante la jornada operativa o la expansión de la flota para garantizar la continuidad del servicio.

- **Análisis detallado de la operación.**
  Un análisis exhaustivo de la operación de las rutas y de los autobuses es necesario para determinar con mayor precisión los requerimientos de equipos y de espacios. Aunque el uso de valores promedio puede servir como punto de partida, es esencial llevar a cabo un estudio detallado que permita optimizar la toma de decisiones relacionadas con la infraestructura de carga y los requerimientos de superficie.

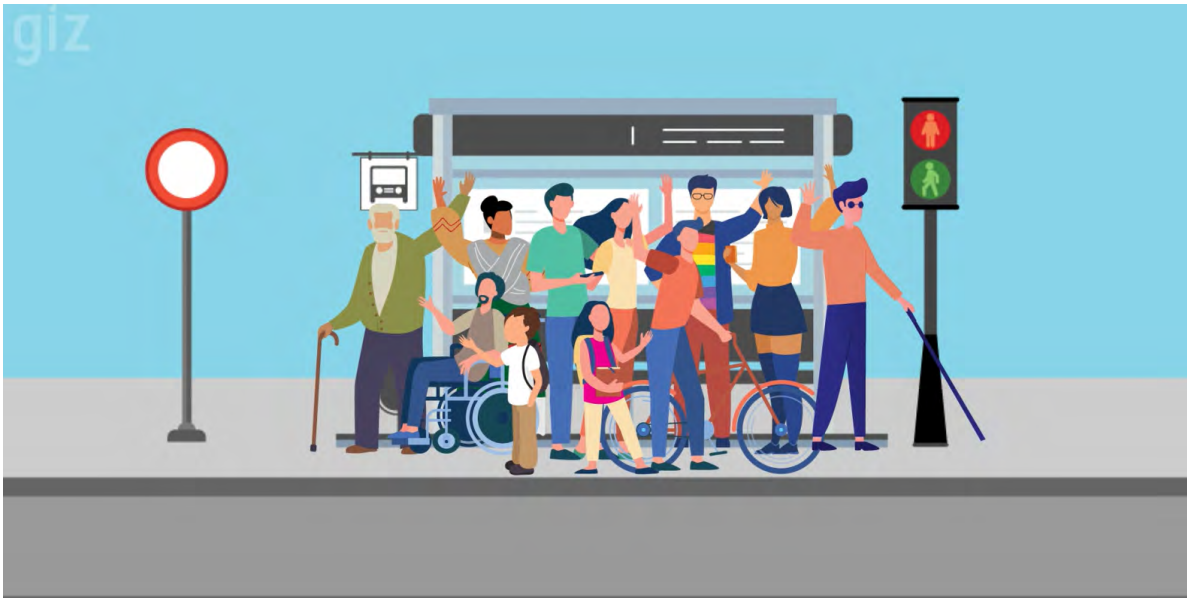
- **Interoperabilidad con otras flotas y ubicaciones.**
  La definición de estándares y protocolos de carga favorece la interoperabilidad entre la flota y los

cargadores. No obstante, se recomienda contemplar este enfoque con planes de carga que cuenten con un alto nivel de control y detalle sobre la autonomía de los autobuses, a fin de asegurar que estos cuenten con los espacios y tiempos necesarios para realizar la recarga de energía conforme a las necesidades operativas.

- **Selección estratégica de la ubicación.**
  Al elegir la ubicación definitiva del patio de carga, es fundamental evaluar cuidadosamente su impacto en la autonomía de los autobuses eléctricos, así como la simplicidad logística y la inversión requerida para la alimentación eléctrica. Alcanzar un equilibrio entre estos factores contribuye a garantizar una operación eficiente y sostenible.

- **Diseño de procedimientos eficientes para la utilización de los cargadores.**
  El cálculo final del número de cargadores debe incluir los tiempos asociados a las distintas actividades que realizan las personas operadoras al ingresar a las instalaciones, tales como la inspección de las unidades, el registro de incidentes, la descarga de información y el lavado. Estos tiempos también forman parte integral de la logística operativa y deben incorporarse en la planeación para garantizar una operación fluida.

- **Planificación de posiciones de carga.**
  Además de determinar la cantidad de cargadores, es necesario analizar la disposición física de los espacios de carga. Estos deben diseñarse de manera que faciliten el acceso, el movimiento y las maniobras de los autobuses, minimizando los tiempos de espera, optimizando el uso de los recursos y procurando la seguridad de las personas. En contextos con limitaciones de espacio, algunos cargadores pueden ver reducida su operatividad, lo cual debe ser considerado desde la etapa de diseño.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aamodt, Aaron, Kelly Cory y Kara Coney. 2021. *Electrifying Transit: A Guidebook for Implementing Battery Electric Buses*. NREL/TP-7A40-76932. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. *https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/76932.pdf.*

DNV. 2021. *Energy Storage Capacity Warranties: Beyond the Fine Print*. DNV. *https://www.dnv.com/article/energy-storage-capacity-warranties-beyond-the-fine-print-200339.*

Finnerty, James. 2023. *What Is an Electric Car Charging Curve?* GRIDSERVE. *https://www.gridserve.com/what-is-an-electric-car-charging-curve/.*