



Generación de información técnica y financiera a partir del desarrollo de pruebas piloto de buses eléctricos en ciudades intermedias de Colombia



Autores: Helmer Acevedo (ICCT), Carlos Bueno (ICCT), Luis Cruz Farak (DNP), Claudia Mercado (DNP)

La iniciativa Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator (ZEBRA), liderada por el Consejo Internacional de Transporte Limpio (ICCT, por sus siglas en inglés) y la Red de Ciudades C40, tiene como objetivo principal combatir el calentamiento global mediante la transformación del mercado de buses en las ciudades de América Latina hacia tecnologías cero emisiones.



TABLA DE CONTENIDO

Introducción	2
Política pública en el transporte público.....	4
Pruebas piloto con buses eléctricos en ciudades colombianas	6
Vehículos eléctricos a batería evaluados.....	8
Resultados de las pruebas piloto	9
Consumo neto de energía por unidad de distancia recorrida	9
Energía regenerada.....	10
Autonomía proyectada	11
Comentarios finales sobre las pruebas piloto.....	12
Costo total de propiedad.....	13
Conclusiones y consideraciones.....	15

INTRODUCCIÓN

Colombia se caracteriza por una marcada dependencia de los combustibles fósiles para sustentar sus actividades productivas en diversos sectores, lo que genera impactos directos en los ámbitos energético, medioambiental y de salud pública. El sector transporte se erige como el principal consumidor energético del país, representando el 41% del consumo final de energía, con una preponderancia del 95.9% en la demanda de combustibles fósiles como gasolina, diésel y queroseno, según el Balance Energético Nacional (Ministerio de Minas y Energía, 2020). Esta dependencia se traduce en que el sector transporte es responsable del 12.5% del total de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en Colombia. Esta participación posiciona al transporte como uno de los sectores clave para las estrategias de mitigación, no solo por su intensidad energética, sino por su creciente participación en el consumo de combustibles líquidos, especialmente en entornos urbanos.

Entre otros desafíos, la *Estrategia de Transporte Sostenible de Colombia*, publicada en 2022, destaca la antigüedad del parque automotor, que incluye buses, busetas y microbuses con más de 20 o 30 años de antigüedad y que utilizan tecnologías que van desde pre-Euro hasta Euro IV. La combinación del elevado consumo de energéticos fósiles y la obsolescencia tecnológica de estos vehículos no solo deteriora la calidad del aire, sino que también incide directamente en la salud de la población colombiana.

En su Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC, del inglés *Nationally Determined Contribution*) actualizada, presentada en 2020, Colombia ha comprometido a limitar sus emisiones a un máximo de 169.44 millones de t CO₂e en 2030 (una reducción del 51%) y a disminuir las emisiones de carbono negro en un 40% respecto a los niveles de 2014 (Ley N° 2169, 2021). El sector transporte tiene la meta de reducir 5 millones de t CO₂e para 2030, a través de medidas de movilidad eléctrica y del Programa de Modernización del Vehículos de Carga. A nivel nacional, el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 (PND) establece una meta de mitigación de 2 millones de t CO₂e por parte del sector transporte durante el cuatrienio.



En este contexto, este documento presenta los resultados de pruebas piloto realizadas con buses eléctricos en los Sistemas Estratégicos de Transporte Público de Pasajeros (SETP)¹ de ciudades intermedias como Montería, Sincelejo, Ibagué y Armenia en el marco de la Política Nacional de Transporte Urbano y la Transición Energética. Adicionalmente, se presentan los hallazgos de pruebas desarrolladas con un bus eléctrico por la iniciativa ZEBRA en una empresa de transporte público colectivo convencional en Medellín. La materialización de estos pilotos busca demostrar los beneficios operacionales y financieros de la tecnología eléctrica, contribuyendo a la sostenibilidad de los sistemas de transporte público de pasajeros—un objetivo fundamental para el Gobierno Nacional no solo en términos de reducción de emisiones, sino también en términos de seguridad energética.

1 Según el Decreto 3422 de 2009, “Los Sistemas Estratégicos de Transporte Público se definen como aquellos servicios de transporte colectivo integrados y accesibles para la población en radio de acción, que deberán ser prestados por empresas administradoras integrales de los equipos, con sistemas de recaudo centralizado y equipos apropiados, cuya operación será planeada, gestionada y controlada mediante el Sistema de Gestión y Control de Flota, SGCF, por la autoridad de transporte o por quien esta delegue y se estructurarán con base en los resultados de los estudios técnicos desarrollados por cada ente territorial y validados por la Nación a través del DNP.” Esto se aplica a ciudades con entre 100.000 y 600.000 habitantes.

POLÍTICA PÚBLICA EN EL TRANSPORTE PÚBLICO

Desde la década de los 90 el Gobierno nacional viabilizó el apoyo financiero a los territorios para promover la implementación y operación de sistemas de transporte masivo. Entre otras iniciativas, el gobierno pasó de un esquema afiliador a un esquema organizado con un modelo de recaudo centralizado y un sistema de gestión y control de flota. De esta manera, con la Política Nacional de Transporte Urbano y de Movilidad Urbana y Regional se han puesto en operación ocho sistemas de transporte público de pasajeros de un total de 16 sistemas con 13.652 buses cofinanciados por la nación; de estos ocho, siete son Sistemas Integrados de Transporte Masivo (SITM)² en ciudades de más de 650 mil habitantes y 1 es un SETP.

En varias ciudades del país se han incorporado autobuses de bajas y cero emisiones en los sistemas de transporte público con y sin cofinanciación del Gobierno Nacional. Por ejemplo, TransMilenio en Bogotá, el MIO en Cali y Metroplús en Medellín ya operan flotas de buses eléctricos, gestionadas por sus respectivos entes operadores. Por otro lado, el Gobierno Nacional cofinanció la adquisición de flota de bajas emisiones del SETP de Valledupar.

Leyes nacionales que limitan la vida útil operativa de los vehículos de servicio público representan una oportunidad fundamental para el reemplazo de estos modelos obsoletos y la renovación del parque automotor de Colombia. En particular, en el artículo 6º de la Ley 105 de 1993, modificado por el artículo 2 de la Ley 276 de 1996, se establece un límite de 20 años a la vida útil máxima de los vehículos terrestres de servicio público colectivo de pasajeros y/o mixto.

Existen diversas políticas para apoyar la modernización de la flota de autobuses. Por ejemplo, artículos 172 y 183 del PND autorizan la cofinanciación del gobierno nacional entre un 40% y 70% dentro del Marco Fiscal de Mediano Plazo en proyectos de sistemas de transporte público de pasajeros, previo cumplimiento de requisitos técnicos. Esto incluye no solo respaldo financiero para los SITM y SETP, sino también para los Sistemas Integrados de Transporte Público³ como el SITP de Bogotá, Sistemas Férreos Urbanos como el Metro Ligero de la Calle 80 en Medellín y la Primera

2 De acuerdo a la Ley 310 y la Ley 336 de 1996, los SITM deben tener una demanda diaria mínima de al menos 300.000 pasajeros en el área urbana o metropolitana, y las ciudades deben ser mayor a 600 mil habitantes.

3 Sistemas Integrados de Transporte Público son un modelo de operación y planificación del transporte colectivo urbano que busca integrar rutas, modos, actores y tarifas en una sola red coordinada, con el objetivo de mejorar la calidad del servicio, reducir tiempos de viaje y disminuir externalidades como la congestión y la contaminación.



Línea del Metro de Bogotá y los Sistemas de Transporte de Integración Regional⁴ como los trenes de cercanía como el Regiotram de Occidente en Cundinamarca y el futuro proyecto del Tren de Cercanías en el Valle del Cauca.

El Gobierno Nacional pretende lograr la inclusión de flota de cero emisiones en los sistemas de transporte público de pasajeros cofinanciados por la nación a través de una estrategia de electrificación a corto y mediano plazo que se viene estructurando el Gobierno nacional. Se plantea implementar en algunos sistemas cofinanciados por la nación, ubicados en ciudades intermedias como Sincelejo, Montería, Armenia, Ibagué, Santa Marta, Neiva, Pasto y Pereira, el proceso de ascenso tecnológico a través de la reposición de flota por vencimiento de su vida útil con buses eléctricos. De esta forma, se busca, distribuir equitativamente los recursos del Estado y llevando igualdad de condiciones de calidad de vida a lo largo del territorio nacional, sin perder el objetivo primordial de una prestación de un servicio de transporte de calidad. Paralelamente, el Departamento Nacional de Planeación ha establecido grupos de trabajo con los entes gestores encargados de la implementación y operación de los sistemas de las ciudades incluidas en la estrategia—incluyendo alcaldías, secretarías de movilidad y de planeación, empresas generadoras, comercializadoras y prestadoras del servicio de energía eléctrica y un comercializador de flota—para evaluar el portafolio ofrecido por esas empresas en materia de movilidad e infraestructura eléctrica, y así, promover la implementación de la tecnología eléctrica en esos sistemas.

4 Sistemas de Transporte de Integración Regional son esquemas de movilidad diseñados para articular el transporte urbano y rural entre varios municipios, áreas metropolitanas y regiones, con el fin de garantizar una conectividad eficiente, segura y sostenible entre zonas con alta interacción económica, social o laboral.

PRUEBAS PILOTO CON BUSES ELÉCTRICOS EN CIUDADES COLOMBIANAS

Este estudio analiza datos derivados de pruebas piloto con buses eléctricos implementadas en diversas ciudades colombianas. Las pruebas se llevaron a cabo en dos contextos principales: en Sistemas Estratégicos de Transporte Público de pasajeros en ciudades intermedias (Montería, Sincelejo, Ibagué y Armenia) y en una operación de transporte público colectivo convencional en Medellín. Se evaluó un bus eléctrico dentro del sistema de transporte de cada ciudad, integrándolo a su operación, gestionando con el ente gestor los permisos de tránsito, con las empresas de energía locales la infraestructura de recarga y el suministro de energía eléctrica, mientras que ZEBRA instaló un dispositivo de telemetría para seguimiento de los parámetros operacionales del vehículo.

La ejecución de los pilotos implicó varias etapas clave. Para establecer la infraestructura de carga necesaria, se realizaron inspecciones conjuntas con las empresas de energía locales para viabilizar la instalación de cargadores eléctricos. Esto resultó en la necesidad de instalar equipos de medida y transformadores provisionales. El costo de la energía consumida fue asumido por la empresa de transporte. Las empresas comercializadoras de energía locales aportaron e instalaron los transformadores provisionales y los cargadores eléctricos. Finalmente, se capacitó al personal encargado de la carga del vehículo en seguridad y uso adecuado de la infraestructura.

En el proceso de preparación para la introducción de los autobuses eléctricos, se llevaron a cabo pruebas en conjunto con las empresas de transporte y el equipo técnico del fabricante para asegurar el desempeño adecuado del bus en condiciones operacionales, verificando aspectos como radios de giro, curvas verticales y pendientes. Los vehículos fueron cedidos mediante contratos de comodato. Se impartió un programa teórico-práctico con los representantes de la fábrica, incluyendo recomendaciones para una conducción eficiente y optimización del desempeño energético. Se definió un plan de operaciones ajustado a la demanda y a los requerimientos de carga para garantizar la autonomía del bus eléctrico en las rutas seleccionadas. Adicionalmente, se obtuvieron permisos y acompañamiento de las autoridades de transporte locales y entes gestores para permitir la operación comercial temporal de los buses durante los pilotos.



Paralelo a los pilotos en las ciudades con sistemas de transporte cofinanciados por la nación, ZEBRA llevó a cabo unas pruebas con un bus eléctrico de 9 metros con Flota Nueva Villa, una empresa del transporte público colectivo convencional en la ciudad de Medellín que opera seis de los nueve servicios que hacen parte del sistema de rutas 6D, el cual atiende el sector nororiental de la ciudad de Medellín. Este estudio también presenta los resultados de este piloto, lo que permite considerar un rango más amplio de experiencias de electrificación.

La evaluación del bus eléctrico prototipo de 7 metros en las ciudades de Montería, Sincelejo, Ibagué y Armenia y de 9 metros en Medellín aporta perspectivas sobre la preparación de infraestructura de recarga, adecuación del vehículo para operar dentro del sistema de transporte, capacitación de conductores, comparación en la operación de buses eléctricos frente a diésel/gas natural en cuanto a conducción, costos de combustible, confort, comodidad, desempeño operacional y autonomía, entre otros. También arrojan luz sobre las inversiones necesarias y ajustes a los planes de operación para la integración de flota de cero emisiones.

VEHÍCULOS ELÉCTRICOS A BATERÍA EVALUADOS

Dos vehículos fueron usados para las pruebas. En las ciudades intermedias Montería, Sincelejo, Ibagué y Armenia, se evaluó un bus eléctrico marca Zhongtong de 7 metros de longitud con capacidad de 30 pasajeros. En la ciudad de Medellín, se evaluó un bus eléctrico marca Zhongtong de 9 metros de longitud con capacidad de 50 pasajeros. Las especificaciones de ambos buses se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones de los vehículos eléctricos evaluados en las pruebas piloto.

Ítem	Sincelejo, Montería, Ibagué y Armenia	Medellín
Marca	Zhongtong	Zhongtong
Capacidad	- 14 sentados - 1 espacio(s) para persona(s) con movilidad reducida - 15 de pie - 1 conductor	- 23 sentados - 1 espacio(s) para persona(s) con movilidad reducida - 27 de pie - 1 conductor
Torque	2450 Nm	2450 Nm
Batería	140,9 kWh	255,48 kWh
Autonomía	Aproximadamente 200 km	Aproximadamente 250-300 km
Longitud	7 m	9 m
Motor	145-200kW	145-245 kW
Aire Acondicionado	No	No

Fuente: Ficha Técnica del Fabricante⁵

Vale la pena mencionar, que ninguno de los dos vehículos contó con aire acondicionado, y las ciudades indicadas previamente, muestran que la temperatura ambiente requeriría el uso de éste. Los datos más relevantes de estas pruebas piloto se observan en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen de las pruebas piloto desarrolladas

Ciudad	Días	# Rutas	Vehículo	Altimetría (m.s.n.m) ⁸	Temperatura Ambiente [oC]
Montería	23	3	7 m	118	23 a 35
Armenia	34	8	7 m	1.480	18 a 24
Ibagué	28	13	7 m	1.225	24 a 32
Sincelejo	28	3	7 m	213	27 a 36
Medellín (Flota Nueva Villa)	18	3 (Alta Pendiente)	9 m	1560	22 a 30
Medellín (Expreso Campo Valdez)	13	3 (Alta Pendiente)	9 m	1560	22 a 30

⁵ <https://navitrans.com.co/vehiculoszhongtong/electricos/>

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PILOTO

CONSUMO NETO DE ENERGÍA POR UNIDAD DE DISTANCIA RECORRIDA

El consumo neto de un vehículo eléctrico es la diferencia entre la energía proveniente de las baterías y la energía que se regenera durante los procesos de desaceleración y frenado. La Figura 1 presenta el consumo neto expresado en kWh por distancia recorrida (kWh/km), el cual depende de múltiples variables como el modo de conducción, la velocidad media, el número de pasajeros transportados, y la topografía de la ruta. Para el vehículo de 7m en las ciudades de Montería, Sincelejo, Ibagué y Armenia se tuvo un consumo promedio entre 0.42 y 0.49 kWh/km; mientras que para el vehículo de 9 m en la ciudad de Medellín fue de 0.64 kWh/km en las dos operaciones donde funcionó; su diferencia se debe a la topografía de las rutas evaluadas.

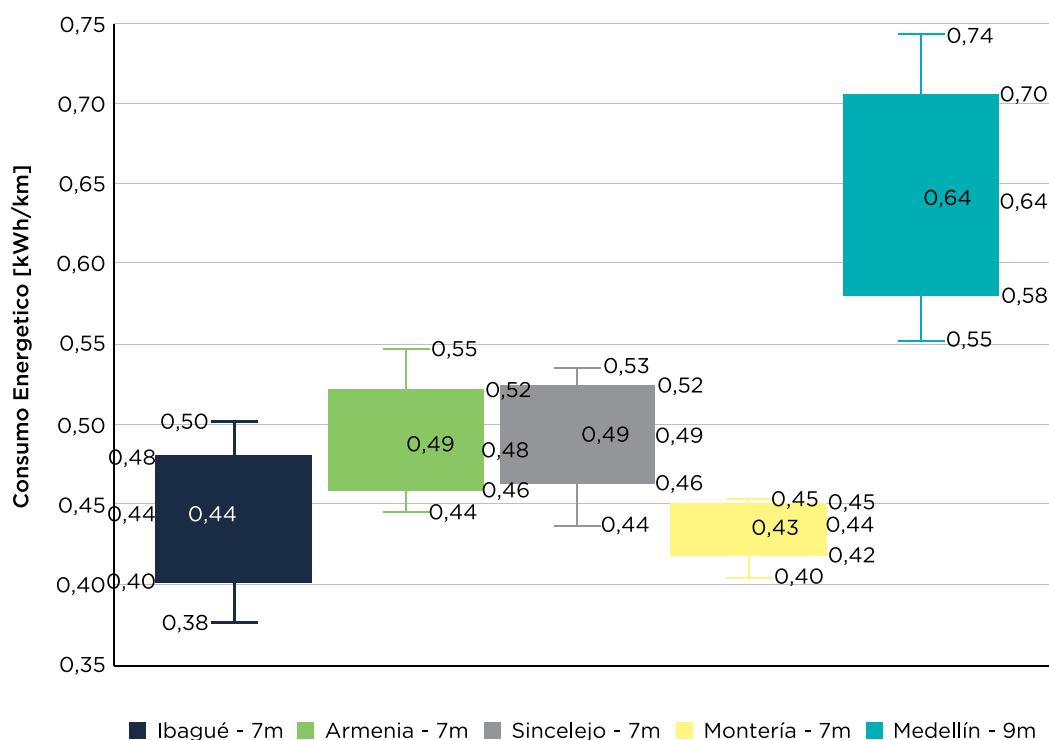


Figura 1. Consumo de energía de los dos autobuses

De acuerdo a información suministrada por los operadores de las ciudades, el consumo de un vehículo similar diésel es de 10 km/gal con un precio de \$9.274/galón, arroja \$927/km para la operación diésel. Para los vehículos eléctricos, dependiendo de la ciudad, la energía puede variar entre \$800 y \$1000/kWh. Siendo así, la operación del bus eléctrico esta entre \$350 y \$638/kWh, siendo entre un 32% y 62% menor que el diésel.

ENERGÍA REGENERADA

La energía regenerada es aquella que, durante las maniobras de desaceleración y frenado del vehículo, se recupera a través del tren motriz y se almacena temporalmente en las baterías. Esta es una de las ventajas más competitivas de la tecnología de vehículos eléctricos. En la Figura 2 se observan los porcentajes de energía regenerada para ambos vehículos en los diferentes pilotos que se llevaron a cabo. Se destaca que el porcentaje de energía regenerada estuvo por encima del 32%. En temas prácticos, de cada 100 kWh que consume un vehículo, al menos el 32 kWh provienen de ese aprovechamiento durante la frenada y la desaceleración. Esta tasa es más alta que la observada por el ICCT en México, donde la regeneración de buses articulados alcanzó el 22% (García Miaja et al., 2023).

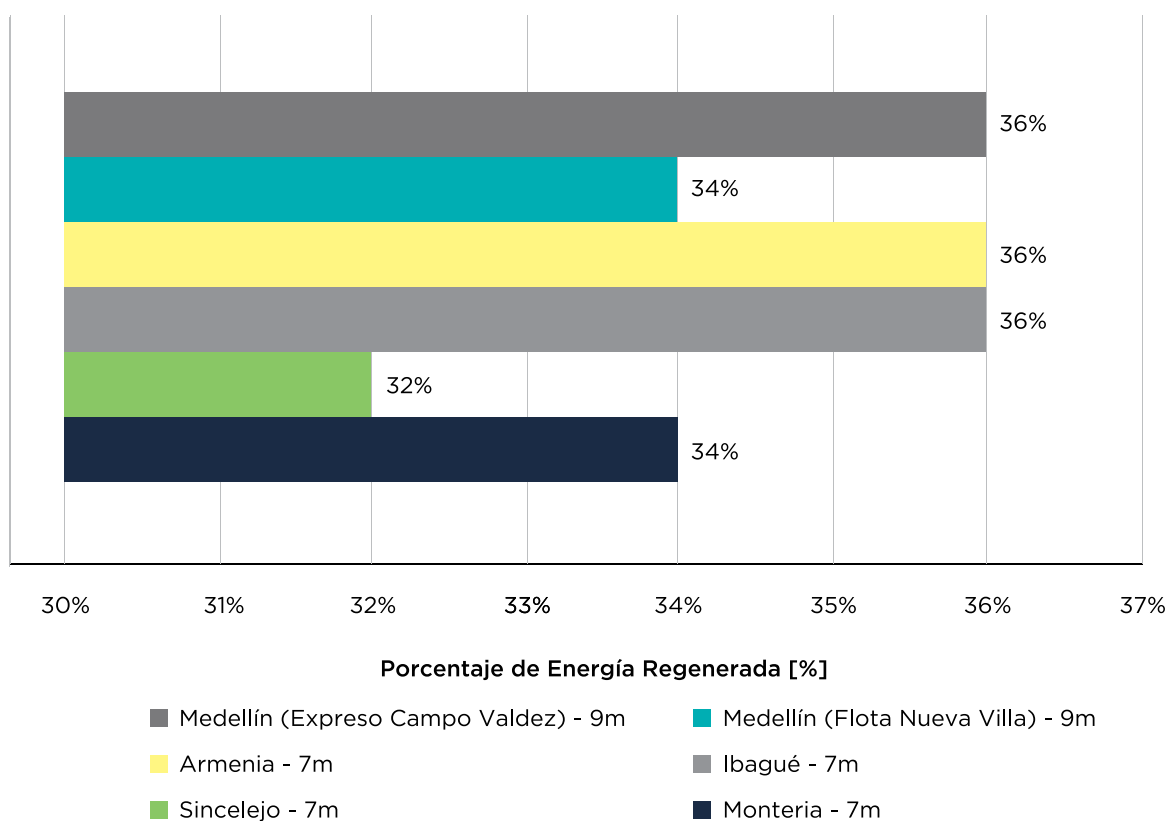


Figura 2. Porcentaje de energía regenerada de los dos autobuses

AUTONOMÍA PROYECTADA

La autonomía proyectada, de acuerdo con la capacidad de las baterías y asumiendo un estado de salud como mínimo del 80%, se muestra en la Figura 3. Dependiendo del consumo energético, que a su vez depende de la ruta y el número de pasajeros transportados, se proyecta la autonomía para cada tipo de baterías (el vehículo de 7 m con capacidad de 140.9 kWh y el vehículo de 9 m con capacidad de 255 kWh). Para el vehículo de 7 m, la autonomía para cada ciudad estuvo entre 176 y 214 kilómetros, mientras que para el vehículo de 9 m osciló entre los 158 y 196 kilómetros. Este nivel de autonomía al final de la vida útil de las baterías es suficiente para las operaciones en ciudades como Medellín y ciudades intermedias, donde las rutas diarias no superan los 180 kilómetros.

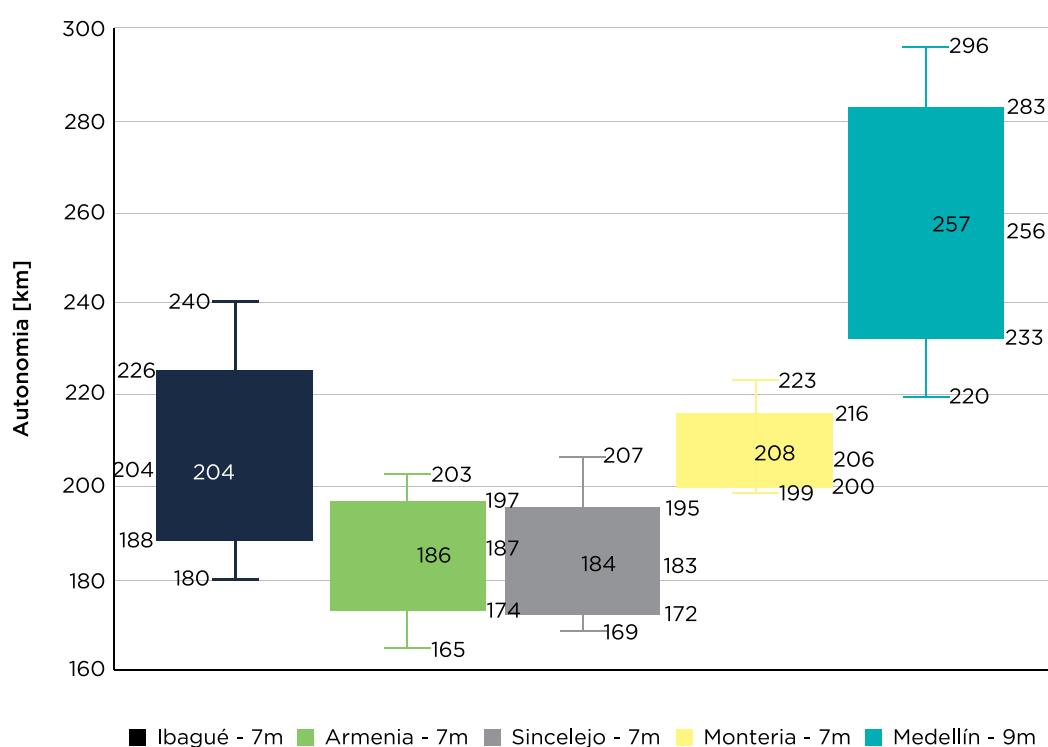


Figura 3. Autonomía proyectada al 80% de estado de salud de las baterías para los dos autobuses en las diferentes ciudades.

Los resultados muestran que los buses eléctricos de 9 m en Medellín lideraron en autonomía operativa, con un promedio de 257 km y valores máximos de hasta 296 km, reflejando una capacidad de batería superior y potencial para rutas de mayor exigencia. Entre los buses de 7 m, Montería destaca por su alta eficiencia, alcanzando una mediana de 208 km con baja dispersión, lo que



sugiere un desempeño energético constante y optimizado. Ibagué también sobresale, con una autonomía media de 204 km y valores que se acercan a los de Medellín, a pesar de ser un vehículo más pequeño. En contraste, Armenia y Sincelejo registran las autonomías más bajas, alrededor de 184–186 km, posiblemente debido a factores como la topografía, tipo de operación o condiciones climáticas locales. Estos datos sugieren que, si bien la longitud del bus influye en la autonomía, la eficiencia operativa depende en gran medida del contexto urbano y de conducción.

COMENTARIOS FINALES SOBRE LAS PRUEBAS PILOTO

En cuanto al desempeño energético, los vehículos cuentan con consumos específicos muy competitivos en comparación con sus similares de combustión interna. La eficiencia de conversión de energía eléctrica supera el 95%, con los rendimientos de 0.50 kWh/km para vehículos de 7 m (30 pasajeros) y 1.0 kWh/km para vehículos de 9 m (50 pasajeros), lo que demuestra que el costo por kilómetro recorrido de un bus eléctrico puede alcanzar hasta un 50% menos que el valor del kilómetro recorrido por un vehículo de combustión interna.

La capacidad de regeneración de los vehículos es elevada bajo las condiciones de operación de los SETPs y SITMs de Colombia. Por la topografía de las rutas en Colombia, estos vehículos logran recuperar entre un 32% y 38% de la energía que usa el vehículo en general. Este ahorro de energía eléctrica es una característica de este tipo de vehículos que es altamente aprovechada en las operaciones de los buses en Colombia.

Finalmente, los buses eléctricos que operaron en Colombia en las pruebas piloto mostraron autonomías suficientes para realizar una recarga eléctrica diariamente, manteniendo los ciclos de carga y descarga de las baterías dentro de las recomendaciones de los fabricantes. Las autonomías logradas fueron alrededor de 180 a 220 km, suficientes para operaciones de SETPs en Colombia.

COSTO TOTAL DE PROPIEDAD

Para complementar los resultados de las pruebas, se realizó un análisis del costo total de propiedad (TCO, del inglés total cost of ownership) de los autobuses diésel, gas natural vehicular (GNV) y eléctrico. La Tabla 3 presenta la desagregación de las principales consideraciones tenidas en cuenta para el cálculo del TCO.

Tabla 3. Principales costos de operación para el TCO

Categoría	Componente	Definición	Valor utilizado en el TCO	
Adquisición del autobús e infraestructura	Pago inicial	Pago inicial para la adquisición del autobús e infraestructura. El resto se asume que es cubierto por el préstamo adquirido.	20% del valor total del vehículo	
	Pagos del préstamo	Pagos a capital e intereses durante el periodo del préstamo.	Tasa de Interés: 10.48%	Evaluación Económico-Financiera de Buses Eléctricos en Colombia, GIZ (2019)
Costos de operación y mantenimiento	Combustible o energía	Costo de combustible o consumo de electricidad por kilómetro, determinado por la eficiencia del vehículo, la distancia recorrida y el costo del energético. Para el caso del cálculo se consideró una eficiencia por kilómetro de 4,23 km/L para el autobús diésel, 4.5 km/m3 para el autobús GNV y 1.42 km/kWh para el autobús eléctrica.	Los valores promedios para las rutas para el año 2024 considerando un consumo promedio del energético son: Diésel: COP \$928/km GNV: COP \$640/km Eléctrico: COP \$335/km	Transporte eléctrico en Latinoamérica: Taller de Buses Cero Emisiones C40 CFF, s. f.)
	Mantenimiento	Costo regular del mantenimiento del autobús. Incluye auto partes, lubricantes y costos de mano de obra, entre otros.	Diésel: COP \$790/km GNV: COP \$810/km Eléctrico: COP \$272/km	Valores para los años 2023 y 2024. ⁶
	Costos de media vida del autobús	Este costo hace referencia a los costos asociados al reemplazo de la batería para el caso de los autobuses eléctricos. Se estima un reemplazo de la batería para cada uno de los buses durante el periodo de evaluación.	18 % del costo total del vehículo	Según Statista (2024), el costo de la batería representa actualmente alrededor del 28 % del precio total de un vehículo eléctrico, con una proyección de bajar al 18 % en 2030.

⁶ Estimación propia de costos operativos para el año 2024: diésel \$790/km, GNV \$810/km y eléctrico \$272/km (Estudio interno, 2024).

La modelación consideró un periodo de financiamiento de 15 años. Este periodo de evaluación es concordante con la vida útil de los vehículos y soportado por el estado de la práctica en la estructuración de proyectos de electrificación de flotas en transporte público. De otra parte, se asume que los costos asociados a conductores, personal de lavado y supervisión, control y monitoreo son similares para todas las tecnologías. Dentro de este contexto, las diferencias de TCO entre las tecnologías evaluadas se enfocan en los componentes que sufren variaciones y en aquellas que no sufren cambios por efecto del ajuste en la tecnología vehicular.

A continuación, se presentan los resultados del análisis TCO. Los valores porcentuales representan la diferencia de costo respecto al vehículo diésel, que sirve como referencia.

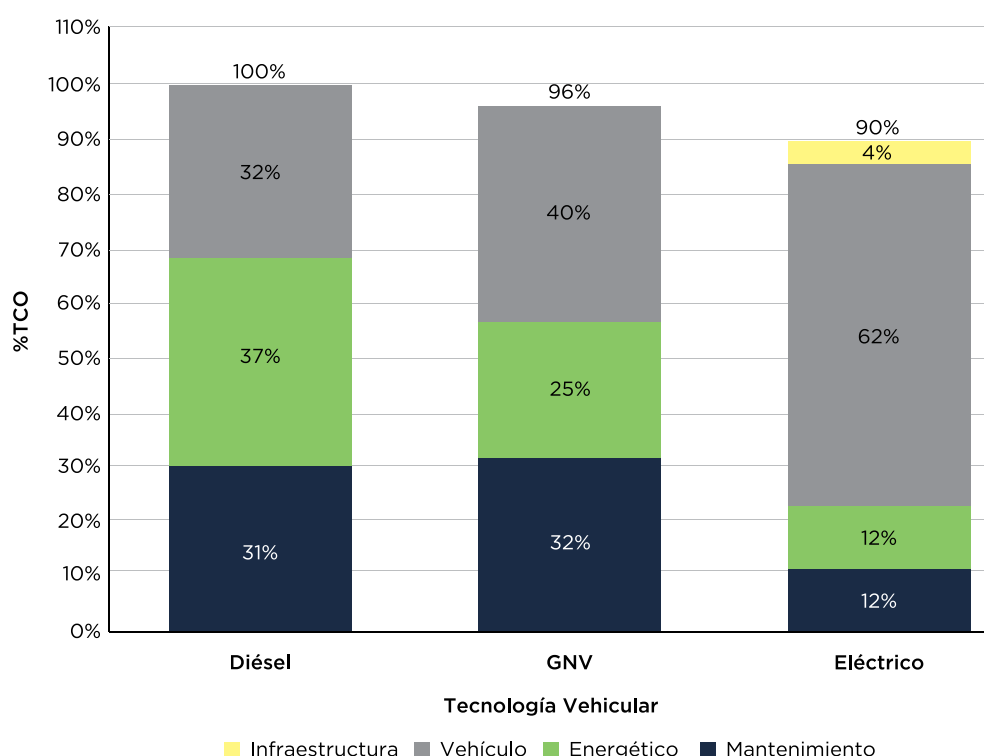


Figura 4. Cambios porcentuales en los componentes del TCO normalizados tomando como base la tecnología diésel

Para los autobuses GNV y eléctrica se observa que, aunque hay una mayor inversión de capital inicial asociada principalmente con la adquisición del vehículo, este exceso es compensado por una reducción importante en los costos operacionales (OpEx, del inglés operating expenditures) que compensan este valor durante la vida útil del autobús. Esta disminución de OPEX es aún más evidente en la tecnología eléctrica, colocándola como la opción más rentable desde el punto financiero, alcanzando una reducción de TCO cercana al 10% respecto a la tecnología diésel.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados de las pruebas piloto con buses eléctricos en ciudades intermedias y en Medellín demuestran que la tecnología de cero emisiones es técnicamente viable, operacionalmente eficiente y **financieramente competitiva** para su integración en los SETP y los SITM en Colombia.

- 1. Viabilidad técnica y operacional comprobada:** Los buses eléctricos evaluados mostraron consumos energéticos entre 0.42 y 0.64 kWh/km, dependiendo del tamaño del vehículo y la topografía de la ciudad. La autonomía operativa era suficiente para cubrir las jornadas diarias en ciudades intermedias, incluso al final de la vida útil de las baterías (176–214 km para buses de 7 m y 158–196 km para buses de 9 m). Se logró una recuperación de energía por frenado de hasta 38%, lo que mejora la eficiencia energética y reduce costos.
- 2. Competitividad financiera frente a tecnologías fósiles:** El análisis del TCO indicó que, aunque el costo inicial de los buses eléctricos es mayor, sus menores costos operativos permiten una reducción cercana al 10% frente a buses diésel durante la vida útil del vehículo. En términos de costos por kilómetro, la tecnología eléctrica representó ahorros entre 32% y 62% respecto al diésel. Los resultados de este estudio respaldan que los proyectos de electrificación son más rentables cuando se consideran los beneficios económicos indirectos, como la mejora en salud pública y reducción de emisiones.
- 3. Condiciones habilitantes identificadas en las pruebas piloto:** Para el despliegue exitoso de autobuses eléctricos, se requiere infraestructura eléctrica adecuada, incluyendo disponibilidad de carga, transformadores y subestaciones. Es clave contar con sistemas de gestión de flota y recaudo centralizado, incluso de bajo costo, para asegurar eficiencia operativa. La capacitación técnica de conductores y operadores también es determinante para maximizar el rendimiento y prolongar la vida útil de la flota.



Los resultados del TCO validan que los proyectos de electrificación pueden alinearse con los criterios de viabilidad financiera exigidos por la cofinanciación del Gobierno Nacional (Art. 172 y 183 del PND 2022-2026). Para apoyar la implementación de autobuses eléctricos en toda Colombia, se puede considerar las siguientes opciones de política:

- Incluir una etapa de validación técnica y financiera de flota eléctrica en todos los proyectos que busquen cofinanciación para la reposición de buses por vencimiento de su vida útil.
- Reforzar los lineamientos técnicos y financieros en la estructuración de proyectos para asegurar que se evite la sobreestimación del costo inicial u OPEX, como ha ocurrido en el pasado, afectando artificialmente la viabilidad de iniciativas de electrificación.
- Promover que los entes gestores, alcaldías y empresas de energía coordinen tempranamente el diseño de soluciones eléctricas para flota cero emisiones, priorizando ciudades incluidas en el plan de transición energética.
- Crear incentivos o esquemas normativos que habiliten a los operadores de transporte a participar en proyectos de infraestructura eléctrica pública o compartida.
- Incluir en la implementación de proyectos de flota cero emisiones la obligación de generar reportes periódicos de desempeño energético, costos operativos y beneficios sociales permitirá al gobierno nacional y al DNP justificar y priorizar inversiones futuras, mostrando retornos no solo económicos, sino también en términos de salud pública, equidad y cambio climático.

LISTADO DE REFERENCIAS

1. **Ministerio de Minas y Energía. (2020).** Balance energético nacional (BECO) 2020. Ministerio de Minas y Energía. <https://www.minenergia.gov.co>
2. **Departamento Nacional de Planeación [DNP]. (2018).** Valoración económica de la degradación ambiental en Colombia 2015. Recuperado de https://fondoaccion.org/wp-content/uploads/2023/05/ITCV_Valoracion-economica_v5.pdf
3. **García Miaja, G., Acevedo, H., Jiménez, C., Pineda, L., & Delgado, O. (2023, enero 1).** Analysis of electric bus performance monitoring in Mexico City. International Council on Clean Transportation. Recuperado de <https://theicct.org/publication/mexico-hvs-zebra-analysis-elec-bus-performance-cdmx-jan23/>
4. **Ley No 2169, de 22 de diciembre de 2021,** <https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/LEY%202169%20DEL%2022%20DE%20DICIEMBRE%20DE%202021.pdf>
5. **LAT GLOBAL S.A.S. (para GIZ TRANSfer III). (2019).** Evaluación económico-financiera de buses eléctricos en Colombia. Recuperado de https://changing-transport.org/wp-content/uploads/202007_Economic-and-financial-report_ExtractESP.pdf
6. **C40 Cities Finance Facility [C40 CFF]. (s. f.).** Transporte eléctrico en Latinoamérica: Taller de Buses Cero Emisiones. Recuperado de <https://c40cff.org/knowledge-library/transporte-electrico-en-latinoamerica-taller-de-buses-cero-emisiones>
7. **Statista. (2024).** Electric vehicle battery price share worldwide from 2016 to 2030. En Teslarati. Recuperado de <https://www.teslarati.com/ev-battery-prices-dropped-15-years/>

CONTACTO

zebra@theicct.org
zebra@c40.org