



Pilotos de buses eléctricos en el sistema de transporte colectivo de la ciudad de Medellín



Agradecimientos: Agradecemos el apoyo de la Secretaría de Movilidad de Medellín, Zhongtong, Navitrans, ENEL X y Empresas Públicas de Medellín (EPM) para el desarrollo de este trabajo, a través de la iniciativa *Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator* (ZEBRA).





TABLA DE CONTENIDO

Introducción	2
Selección de los servicios	4
Implementación de los pilotos	7
Resultados	9
Conclusiones	12

INTRODUCCIÓN

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. La iniciativa ha enfocado sus esfuerzos en catalizar la transformación en las ciudades de Santiago de Chile, Ciudad de México, São Paulo y Medellín, focalizando su trabajo en cuatro pilares fundamentales:

- **Generación de demanda:** Se basa en el trabajo con las autoridades de las ciudades para lograr compromisos públicos hacia la electrificación y con los operadores para desarrollar estrategias de despliegue de flota 100% cero emisiones.
- **Ampliación de la oferta:** Se enfoca en el trabajo con fabricantes para que se comprometan a ofrecer buses cero emisiones comercialmente en la región.
- **Disponibilidad de fondos de financiación:** Se concentra en el trabajo con inversionistas para que se comprometan a invertir alrededor de 1.000 millones de dólares para proyectos de despliegue de buses cero emisiones bien estructurados.
- **Generación de confianza:** Se transmite, entre los diferentes actores y ciudades, información asociada a casos de éxito y lecciones aprendidas.

Para el caso específico de la ciudad de Medellín y de los demás municipios que conforman el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), se ha identificado al sistema de transporte tradicional como un componente importante de la movilidad, al operar cerca del 67% de las rutas del sistema de transporte público de pasajeros. Dentro de este contexto, el presente reporte muestra el desarrollo de los pilotos de buses cero emisiones liderados y supervisados por la Secretaría de Movilidad de Medellín, puestos en marcha en conjunto con dos de las empresas de transporte público colectivo de la ciudad y soportados técnicamente por la iniciativa ZEBRA y sus aliados. Estos pilotos fueron llevados a cabo de forma secuencial entre febrero y mayo de 2023 en las rutas de las empresas Flota Nueva Villa (FNV) y Expreso Campo Valdés (ECV).

La siguiente sección analiza la selección de las rutas a operar con buses eléctricos, y posteriormente se describen las actividades llevadas a cabo

dentro de cada uno de los pilotos. Finalmente se exponen conclusiones y recomendaciones para procesos de similares características a realizarse en el contexto latinoamericano.

SELECCIÓN DE LOS SERVICIOS

Actualmente, FNV 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. En relación con la demanda de la empresa, la Figura 1 muestra el comportamiento agregado de todos los servicios a lo largo de los diferentes días de la semana. Se identificaron brechas nocturnas y diurnas, las cuales pueden ser usadas para la carga de los buses eléctricos.

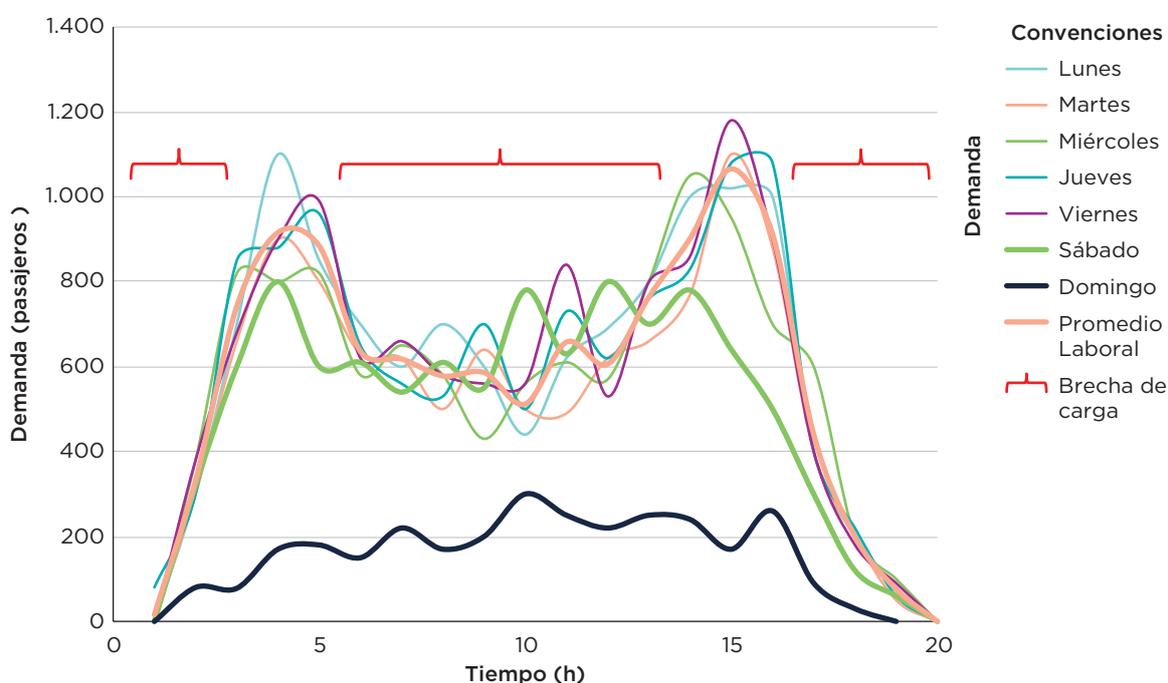


Figura 1. Perfil de demanda, horario segregado por tipo de día. Fuente: Elaboración propia basada en información de FNV.

Del total de los servicios de la empresa, se seleccionaron tres representativos, que permitieron evaluar las condiciones topográficas y de autonomía más exigentes. Los servicios seleccionados corresponden a las rutas que operan sobre los sectores de la Avenida 33, el San Juan y San Antonio. La Figura 2 muestra los trazados y las características principales de las rutas seleccionadas para el piloto, las cuales atienden las comunas 3 - Manrique, 8 - Villa Hermosa y 10 - Candelaria.

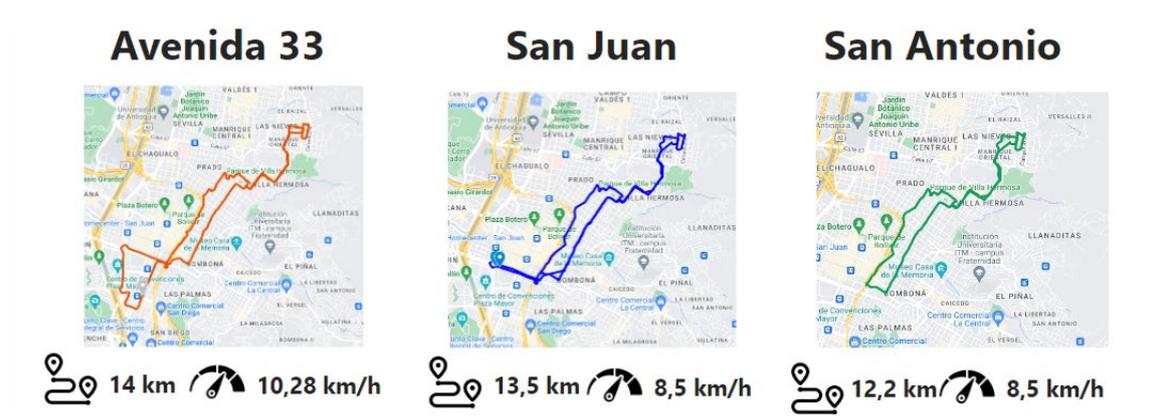


Figura 2. Trazado de las rutas evaluadas en la empresa FNV. Fuente: Elaboración propia basada en información de FNV.

Como se observa, los servicios operan en sectores barriales con longitudes que oscilan entre 12,2 y 14 km, y velocidades inferiores a los 11 km/h. Adicionalmente, como se observa en la Figura 3, las rutas presentan condiciones topográficas exigentes requiriendo que los vehículos operen en pendientes que en muchos casos son superiores al 20%.



Figura 3. Perfil de elevación de la ruta San Juan. Fuente: Elaboración propia basada en información de FNV.

De otra parte, la empresa ECV opera tres servicios que hacen parte del sistema de rutas 6C, el cual atiende el sector nororiental de la ciudad de Medellín. De estos servicios, se ha seleccionado la ruta 5C, la cual cuenta con un recorrido de 12 km y presenta una inclinación promedio de 4,4% y pendientes máximas que superan el 25%. La Figura 4 presenta el trazado y las condiciones topográficas de la ruta evaluada.



Figura 4. Trazado y perfil de elevación de la ruta 5C. Fuente: Elaboración propia basada en información de ECV.

IMPLEMENTACIÓN DE LOS PILOTOS

Para la implementación de los pilotos, se llevaron a cabo las siguientes actividades claves relacionadas con la infraestructura de carga y el bus eléctrico. Estas pueden ser replicadas en otros pilotos a realizarse en los sistemas e transporte colectivos de Colombia:

INFRAESTRUCTURA DE CARGA

- Solicitud de disponibilidad eléctrica a la empresa de energía local: Para el primer piloto realizado con FNV, se realizó inspección, en conjunto con Empresas Públicas de Medellín (EPM), con el objetivo de viabilizar la instalación del cargador eléctrico. Como resultado, se definió la necesidad de instalar un equipo de medida y un transformador provisional para garantizar la adecuada conexión del cargador a la red eléctrica. El pago de la energía consumida estuvo a cargo de FNV, mediante el consumo registrado en el equipo de medida. Para el segundo piloto realizado con ECV, se utilizó la infraestructura de carga instalada en el terminal de FNV, la cual fue considerada en el primer piloto del bus eléctrico, definiéndose

que el pago de la energía consumida estaría a cargo de ECV mediante el consumo registrado en el equipo de medida.

- Instalación de cargador: Para los pilotos, el partner para la infraestructura de carga fue ENELX, miembro de la red de inversionistas de la iniciativa ZEBRA. Esta empresa aportó en el piloto la disposición e instalación del transformador provisional, requerido por EPM, y el cargador eléctrico de 150 kW que se utilizó en el piloto.
- Capacitación: Se capacitó al personal encargado de realizar la carga del vehículo en aspectos relacionados con la seguridad y el adecuado uso de la infraestructura de carga.

FLOTA ELÉCTRICA

- Pruebas con la flota: Para cada uno de los pilotos, se realizaron pruebas en terreno, en conjunto con las empresas de transporte respectivas (FNV, ECV) y el equipo técnico de Navitrans, con el objetivo de garantizar el adecuado desempeño del bus en condiciones operacionales. Dentro de los aspectos verificados se incluyeron radios de giro, curvas verticales y pendientes. Para el piloto, se seleccionó un busetón marca Zhongtong serie LCK6850EVG, con longitud de 9 m y capacidad para 50 pasajeros. La batería nominal usada fue de 255,48 kW. Este vehículo fue puesto a disposición de FNC y ECV por Navitrans mediante un contrato de comodato.
- Capacitación de conductores: En conjunto con Navitrans, se impartió un programa de capacitación teórico-práctico relacionado con la conducción del bus. Se incluyeron dentro de este programa tips para la conducción eficiente con el objetivo de mejorar el desempeño energético del bus eléctrico.
- Plan operación-carga: De acuerdo con el comportamiento de la demanda, se definió el plan de operaciones para cumplir con los despachos requeridos y ajustarse a los requerimientos de carga, para garantizar la autonomía del bus eléctrico en cada una de las rutas seleccionadas.
- Interacción con la autoridad: Finalmente, se solicitaron los permisos temporales de operación a la Secretaría de Movilidad de Medellín con el objetivo de permitir la operación comercial del bus de forma momentánea en cada una de las empresas de transporte mientras se realizaban los pilotos.

RESULTADOS

Para la ejecución del piloto con FNV, se operó el bus eléctrico durante 18 días (desde el 16 febrero hasta el 3 marzo 2023), movilizandoo 3.850 pasajeros y ejecutándose el siguiente plan de carga, en el cual se observa que no se requirió cargar el bus todos los días de operación y que el consumo promedio alcanzó 1,05 kWh/km (Tabla 1).

Tabla 1. Análisis de recargas eléctricas realizadas al bus durante el piloto. Fuente: Elaboración propia con datos Navitrans

Recarga	Fecha	Estado de carga (SOC, por sus siglas in inglés)			Batería usada (kWh)	Kilometros recorridos	Consumo (kWh/km)
		Inicial	Final	Empleado			
1	16-17 feb. 2023	98%	27%	71%	172,32	148	1,16
2	17-18 feb. 2023	98%	24%	74%	179,60	159	1,13
3	20 feb. 2023	98%	25%	73%	177,18	149	1,19
4	21 feb. 2023	98%	23%	75%	182,03	133	1,37
5	21-23 feb. 2023	98%	45%	53%	128,63	110	1,17
6	24 feb. 2023	98%	51%	47%	114,07	132	0,86
7	25 feb. 2023	98%	52%	46%	111,64	116	0,96
8	26-27 feb. 2023	99%	24%	75%	182,03	211	0,86
9	28 feb. 2023	98%	53%	45%	109,22	112	0,98
10	1 mar. 2023	99%	48%	51%	123,78	123	1,01
11	2 mar. 2023	99%	50%	49%	118,93	120	0,99
12	3 mar. 2023	99%	49%	50%	121,35	122	0,99
13	6 mar. 2023	98%	58%	40%	97,08	97	1,00
14	7 mar. 2023	98%	46%	52%	126,21	117	1,08
15	8 mar. 2023	98%	54%	44%	106,79	107	1,00

De otra parte, el piloto realizado con ECV se realizó en operación comercial durante 13 días, recorriendo el servicio seleccionado. Estas pruebas permitieron mover 1.392 pasajeros, utilizando 0,83 kWh/km y obteniendo los principales indicadores generales de asociados que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Análisis de recorridos realizados con el bus eléctrico en la ruta 52C. Fuente: Base de datos Navitrans.

Date	SOC			Batería usada (kWh)	Kilometros recorridos	Consumo (kWh/km)
	Inicial	Final	Empleado			
27 abr. 2023	89%	82%	7%	16,81	11	1.53
	82%	78%	4%	9,61	10	0.96
	78%	74%	4%	9,61	12	0.80
	74%	70%	4%	9,61	13	0.74
	70%	64%	6%	14,41	17	0.85
	64%	59%	5%	12,01	13	0.92
	59%	53%	6%	14,41	13	1.11
28 abr. 2023	53%	48%	5%	12,01	13	0.92
	48%	44%	4%	9,61	11	0.87
	44%	40%	4%	9,61	12	0.80
	40%	35%	5%	12,01	11	1.09
8 may. 2023	100%	97%	3%	7,20	8	0.90
	54%	49%	5%	12,01	12	1.00
9 may. 2023	100%	97%	3%	7,20	7	1.03
	97%	93%	4%	9,61	11	0.87
	93%	90%	3%	7,20	11	0.65
	90%	86%	4%	9,61	13	0.74
	82%	79%	3%	7,20	11	0.65
	86%	82%	4%	9,61	12	0.80
	79%	75%	4%	9,61	12	0.80
10 may. 2023	75%	70%	5%	12,01	13	0.92
	70%	67%	3%	7,20	11	0.65
	67%	63%	4%	9,61	13	0.74
	63%	59%	4%	9,61	12	0.80
	59%	54%	5%	12,01	13	0.92
	54%	50%	4%	9,61	13	0.74
	50%	46%	4%	9,61	12	0.80
11 may. 2023	46%	41%	5%	12,01	13	0.92
	100%	97%	3%	7,20	6	1.20
	97%	94%	3%	7,20	11	0.65
	94%	89%	5%	12,01	17	0.71
	89%	86%	3%	7,20	9	0.80
	86%	82%	4%	9,61	13	0.74
12 may. 2023	82%	78%	4%	9,61	12	0.80
	78%	74%	4%	9,61	12	0.80
	74%	70%	4%	9,61	11	0,87
	70%	66%	4%	9,61	11	0,87
	66%	63%	3%	7,20	11	0,65
	63%	58%	5%	12,01	12	1,00
13 may. 2023	58%	54%	4%	9,61	13	0,74
	54%	48%	6%	14,41	14	1,03
	48%	45%	3%	7,20	10	0,72
	45%	41%	4%	9,61	12	0,80
14 may. 2023	41%	33%	8%	19,21	23	0,84
	100%	96%	4%	9,61	16	0,60
	96%	93%	3%	7,20	7	1,03
15 may. 2023	93%	90%	3%	7,20	11	0,65
	90%	86%	4%	9,61	13	0,74
	86%	82%	4%	9,61	13	0,74
	82%	79%	3%	7,20	12	0,60
	79%	75%	4%	9,61	13	0,74
	75%	70%	5%	12,01	13	0,92
16 may. 2023	70%	65%	5%	12,01	16	0,75
	65%	61%	4%	9,61	12	0,80
	61%	57%	4%	9,61	13	0,74
	57%	52%	5%	12,01	11	1,09
	52%	47%	5%	12,01	13	0,92
	47%	43%	4%	9,61	11	0,87
17 may. 2023	43%	39%	4%	9,61	12	0,80
	100%	97%	3%	7,20	11	0,65
	97%	93%	4%	9,61	13	0,74
20 may. 2023	86%	83%	3%	7,20	11	0,65
	72%	69%	3%	7,20	11	0,65
	69%	65%	4%	9,61	12	0,80
	65%	62%	3%	7,20	10	0,72

Con los resultados obtenidos en el piloto se procedió a calcular el costo total de propiedad (TCO, por sus siglas en inglés) para las tecnologías diésel y eléctrica considerando el consumo energético crítico encontrado en las dos empresas de transporte. Los resultados mostrados en la Figura 5 demuestran que la tecnología eléctrica presenta TCO menores que la diésel, demostrando su competitividad desde el punto de vista financiero, aun considerando el mayor consumo energético promedio observado en los pilotos.

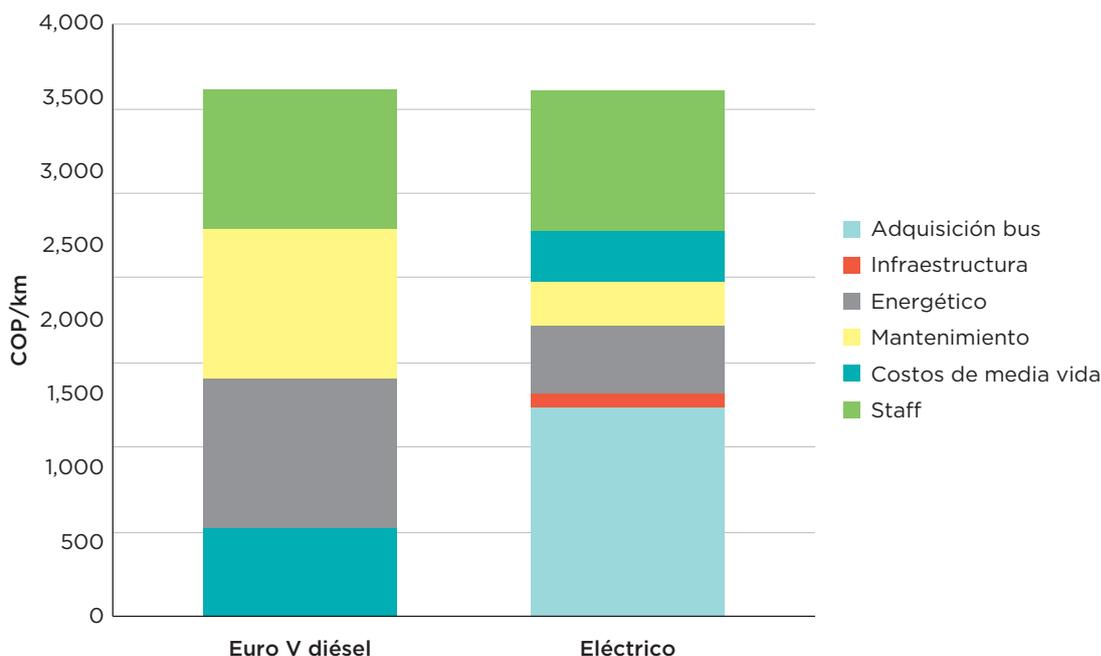


Figura 5. Resultados de TCO basados en la información obtenida en los pilotos. Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Los pilotos de buses eléctricos en la ciudad de Medellín sugieren que la implementación de una operación comercial con buses eléctricos podría ofrecer beneficios desde el punto de vista operacional, financiero y ambiental. Desde el punto de vista operacional, se concluye que el desempeño energético del bus fue adecuado, sin presentarse ningún contratiempo a nivel técnico y cumpliendo con los requerimientos de potencia necesarios asociados con la pendiente del terreno. Adicionalmente, se observa que, dadas las condiciones operacionales de las rutas evaluadas, los vehículos a implementar en futuras operaciones comerciales podrían ser configurados con baterías de menor tamaño y con carrocerías con longitudes



totales cercanas a los 8 m. Estos ajustes podrían redundar en la reducción de los consumos energéticos obtenidos.

De otra parte, desde el punto de vista financiero, con los consumos medidos se obtuvieron valores kWh de COP\$420 y COP\$332 para los pilotos de FNV y ECV, respectivamente, una reducción entre 30% y 38% en el costo energético al usar un bus eléctrico en reemplazo de uno diésel.

Pilotos de buses cero emisiones son procesos valiosos para poder evaluar en detalle las oportunidades tecnológicas, organizativas y regulatorias del despliegue de estas tecnologías en el mundo real. Desde el punto de vista tecnológico los pilotos permiten analizar la cantidad de baterías requeridas, la potencia de los buses, el diseño de las carrocerías y los costos reales de operación y mantenimiento. Adicionalmente, para el sistema de carga es posible identificar el tipo y potencia de cargador requerido y su concordancia con los planes de carga necesarios para cumplir con la programación de despachos de los buses. Desde el punto de vista organizacional los pilotos permiten implementar programas de capacitación o proponer cambios organizacionales para poder hacer efectiva la implementación de la electromovilidad en las empresas. Finalmente, los pilotos permiten establecer la ruta desde el punto de vista regulatorio y contractual para reducir costos y tiempos de implementación.

CONTACTO

zebra@theicct.org
zebra@c40.org



SOCIOS IMPLEMENTADORES