

Análisis de factibilidad técnica y económica del uso de vehículos eléctricos en la recolección y transporte de residuos domiciliarios



Análisis de factibilidad técnica y económica del uso de vehículos eléctricos en la recolección y transporte de residuos domiciliarios.

©2024, PNUD Uruguay

Autoría: SEG Ingeniería

Este trabajo es el resultado del estudio desarrollado por SEG Ingeniería, realizado para el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) en el marco del Proyecto ONU/21/001 “Financiación innovadora para soluciones de tecnología limpia en el sector de las energías renovables de Uruguay: El Fondo de Innovación de Energías Renovables (REIF)”

Según las normas aplicadas por el PNUD en todo el mundo, los autores y autoras de estas investigaciones gozan de completa independencia editorial, y aplican criterios de objetividad e imparcialidad en sus análisis.

El análisis, los hallazgos y las recomendaciones contenidos en este informe son responsabilidad exclusiva de los autores y no reflejan necesariamente las opiniones del PNUD, de las Naciones Unidas, de su Junta Ejecutiva, de sus Estados miembros ni de las instituciones públicas nacionales que participan como contrapartes o miembros del Proyecto ONU/21/001. Se agradece la difusión y reproducción de este informe en cualquier medio, con indicación de la fuente.

El uso genérico del masculino que se utiliza en esta publicación responde a la intención de simplificar la redacción y disminuir la sobrecarga en la lectura. Por lo tanto, de ninguna manera pretende constituir una discriminación entre mujeres y varones, lo cual es una preocupación para este equipo de trabajo.

Contenido

Siglas.....	3
1 Resumen Ejecutivo	4
2 Introducción	6
3 Objetivos y alcance.....	7
4 Casos de estudio a nivel internacional	9
5 Relevamiento y evaluación de experiencias locales.	33
6 Evaluación de ventajas y desventajas del uso de vehículos eléctricos en la recolección y transporte de residuos domiciliarios.....	38
7 Aspectos técnicos del uso de vehículos eléctricos para la recolección y transporte de residuos domiciliarios	51
8 Evaluación Económica	68
9 Factibilidad Técnico - Financiera	88
10 Recomendaciones para la transición a VE en la gestión de residuos domiciliarios	106
11 Anexo 1: Relevamiento de las flotas actuales	112
12 Anexo 2: Evaluación de rendimientos.....	116
13 Anexo 3: Supuestos considerados para la evaluación económica	121
14 Bibliografía.....	123

Siglas

- AC: corriente alterna
- BMS (Battery Management System)
- CCS: Combined Charging System
- CO₂e: Emisiones de CO₂ equivalentes
- CTP: Costo Total de Propiedad
- DC: corriente directa
- DOD: profundidad de descarga en inglés.
- GEI: Gases de Efecto Invernadero
- Km: kilómetros
- LFP: Batería de Litio ferrofostato
- MEF: Ministerio de Economía y Finanzas
- NCA: Batería de Níquel, Cobalto y Aluminio
- NCM: Batería de Níquel, Cobalto y Manganeseo
- PBT: Peso Bruto Total
- SDF: Sitio de Disposición Final
- SOC State of Charge (Estado de carga de una batería)
- SOH: State of Health (Estado de salud de una batería)
- TCO: Total Cost of Ownership (equivale a CTP en inglés)
- Ton: toneladas

1 Resumen Ejecutivo

El proceso de electrificación de las flotas de recolección de residuos es aún incipiente en el mundo. Del relevamiento de experiencias realizado, se destacan las experiencias en ciudades de México, España, Estados Unidos, Dinamarca, Chile, Brasil, entre otros, que adoptan la forma de proyectos piloto, destacando tanto los aspectos técnicos como los logísticos y económicos de estas iniciativas.

En la región, las experiencias más destacadas son las de Chile y Brasil. En el caso de Chile, se está realizando un proyecto piloto con camiones eléctricos para la recolección de residuos, mientras que en el caso de Brasil, es donde desde hace varios años se encuentran operando algunas decenas de camiones recolectores en condiciones reales de operación destacando los desafíos técnicos y logísticos involucrados en la implementación de estas iniciativas.

A nivel local, no existe ninguna experiencia con camiones recolectores pesados y las únicas experiencias en el sector refieren a la introducción de camiones livianos realizados por las Intendencias de Canelones y Rocha.

En el caso de Canelones, la experiencia comenzó en 2023 con la incorporación de 5 camiones eléctricos livianos para la recolección de residuos reciclables y a partir del 2024 se han incrementado a 7, con planes de alcanzar entre 12 y 13 unidades. Por otro lado, en Rocha se encuentra operando un camión eléctrico liviano realizando servicios de recolección de residuos sólidos urbanos.

Además de los camiones eléctricos, la otra experiencia identificada consiste en la inclusión de motocarros eléctricos en varias localidades del país, aunque se carece de información detallada sobre su implementación y desempeño en el contexto de recolección de residuos.

Como parte de los análisis realizados, se evaluaron las ventajas y desventajas de los vehículos eléctricos en la recolección y transporte de residuos considerando experiencias previas de electrificación en otros sectores y entrevistas con expertos.

Las ventajas de los vehículos eléctricos incluyen la reducción de consumo de combustibles fósiles, así como de las emisiones contaminantes y acústicas, su contribución a la soberanía energética al consumir energía producida internamente, estabilidad de costos y mejora en la calidad del servicio y condiciones laborales. Además, estos vehículos requieren menor mantenimiento y presentan un menor costo económico a largo plazo.

Por otro lado, dentro de las desventajas se pueden mencionar una mayor inversión inicial, la necesidad de infraestructura de recarga y posibles limitaciones en la disponibilidad debido a tiempos de recarga más largos, así como una menor disponibilidad de ofertas de este tipo de vehículos, sobre todo en aquellos más especializados.

in embargo, el contexto uruguayo, con una alta proporción de energías renovables en la generación eléctrica, favorece la viabilidad ambiental y económica de los vehículos eléctricos.

Como parte del relevamiento de la oferta disponible de vehículos eléctricos para la recolección de residuos en el país, se mantuvieron contactos con la totalidad de los potenciales proveedores, los cuales a su vez debieron contactar con los fabricantes a los efectos de proporcionar información técnica y económica de los equipos.

Se mantuvieron contactos con varios gobiernos departamentales y empresas privadas que desarrollan sus actividades en el sector de recolección de residuos a los efectos de relevar su predisposición a la incorporación de vehículos eléctricos así como entender la operativa actual con el objetivo de poder confeccionar los escenarios para evaluar la factibilidad técnica y económica de la introducción de vehículos eléctricos.

La evaluación técnica y económica de la incorporación de vehículos eléctricos para la recolección de residuos muestra que en el caso de los camiones livianos la introducción es viable y conveniente, para todos los escenarios relevados, por lo cual la recomendación en este caso pasa por el diseño de un plan de incorporación de este tipo de vehículos a los sistemas de recolección de residuos, asociado sobre todo al avance de los esquemas de recolección de residuos secos reciclables.

En el caso de los camiones recolectores equipados con cajas compactadoras, las conclusiones a las cuales llega este trabajo no son concluyentes en algunos de sus aspectos.

En lo que hace a los aspectos técnicos, las autonomías relevadas serían suficientes para operar en 1 o 2 turnos, bajo distinto tipo de circuitos, pudiéndose requerir en algunos de los casos de recargas intermedias para alcanzar las autonomías requeridas. Surgen limitaciones técnicas con relación al ingreso de los camiones recolectores a los sitios de disposición final, para lo cual se requerirían equipos de tracción 6x4.

También se han relevado limitaciones en cuanto a la posible utilización de camiones de levante lateral de contenedores, los cuales presentan mayores requerimientos energéticos y donde no existen aún condiciones para avanzar en su incorporación.

En lo que hace a los análisis económicos desarrollados, los mismos no son concluyentes acerca de la conveniencia de la incorporación de vehículos eléctricos en este segmento, siendo que los resultados pueden variar. La evaluación realizada arrojó poca diferencia entre los CTP de trabajar con camiones eléctricos o convencionales. Posibles variaciones en las variables proyectadas, que por tratarse de proyecciones futuras son inciertas, provocan cambios en la conveniencia entre una u otra opción. También varían los resultados según se suponga un horizonte de 8 o 15 años en el análisis o se incorporen o no los efectos de exoneración de impuestos cuando se trata de proyectos promovidos por COMAP.

De este modo, y teniendo en cuenta lo expresado precedentemente, el curso de acción sugerido pasa por la realización de experiencias iniciales bajo el formato de pilotos de prueba donde se pueda analizar la factibilidad técnica y económica de la incorporación de este tipo de vehículos en las operaciones de recolección de residuos mezclados y comenzara a generar aprendizaje y capacidades técnicas para etapas posteriores.

2 Introducción

Esta consultoría se enmarca en el REIF (Fondo de Innovación en Energías Renovables), el cual busca apoyar la segunda transición energética de Uruguay mediante la transición hacia tecnologías bajas en emisiones de carbono en la industria, el transporte, los sectores comercial y residencial.

El programa se apoya en la transición energética como motor para acelerar el desarrollo económico y social de Uruguay, contribuyendo a mejorar la sostenibilidad ambiental y promoviendo la inclusión social y de género.

Hoy el país se enfrenta a nuevos desafíos para reducir el uso de combustibles fósiles: descarbonizar la economía mediante la transformación del transporte, así como la sustitución gradual de otros usos de energías no renovables en los sectores industrial, residencial y comercial.

Adicionalmente en el Plan Nacional de Gestión de Residuos, en el capítulo de Disposición, recolección y transporte, uno de los objetivos estratégicos es el de fomentar *la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al servicio de recolección y transporte de residuos*, por lo que se requiere contar con el análisis técnico y económico para la transición hacia vehículos de bajas emisiones.

Esta nueva transición hacia el uso de tecnologías innovadoras con bajas emisiones de carbono y que incrementen la eficiencia del sistema eléctrico pone a Uruguay a la vanguardia del desarrollo sostenible.

Los compromisos a nivel mundial se centran en limitar el calentamiento global a 1,5°C y lograr cero emisiones netas de gases de efecto invernadero (principalmente dióxido de carbono y metano) para 2050. La recolección de residuos domiciliarios, realizada por las intendencias, juega un papel importante en el potencial para disminuir dichas emisiones.

3 Objetivos y alcance

Objetivos

La presente consultoría tiene por objetivos estudiar la factibilidad técnica y económica del uso de vehículos eléctricos en la recolección y transporte de residuos domiciliarios, indicando los principales desafíos y consideraciones para tener en cuenta en la transición.

Como resultados, se deberá producir un informe de evaluación y recomendaciones para promover la transición a una recolección y transporte de residuos domiciliarios con vehículos eléctricos a nivel nacional, incluyendo el análisis y alternativas para distintas escalas de localidades en el país.

Alcance de la consultoría

Llevar adelante un proceso de relevamiento, revisión, estudio, análisis y redacción de un informe en español que evalúe:

- 1) Casos de estudio a nivel internacional de la adopción de vehículos eléctricos para la gestión de residuos domiciliarios y su correspondiente evaluación de impacto.
- 2) Relevamiento y evaluación de experiencias locales en movilidad eléctrica para recolección y transporte de residuos domiciliarios.
- 3) Evaluación de ventajas y desventajas del uso de vehículos eléctricos en vez de vehículos a combustión interna en la recolección y transporte de residuos domiciliarios.
- 4) Aspectos técnicos del uso de vehículos eléctricos para la recolección y transporte de residuos domiciliarios incluyendo, pero no exhaustivamente, los siguientes aspectos:
 - a) Disponibilidad en el mercado internacional de vehículos eléctricos de recolección de residuos y sus principales características, costos y variables de desempeño. Se deberán integrar diferentes modelos y tamaños teniendo en cuenta la realidad nacional.
 - b) Se deberán comparar funcionalidades y variables de desempeño de dichos vehículos en relación con las alternativas existentes a combustión interna en el país y en el mercado internacional.
- 5) Aspectos económicos-financieros de una transición nacional a vehículos eléctricos para la recolección y transporte de residuos domiciliarios, incluyendo, pero no exhaustivamente:
 - a) Costos de inversión y costos operativos de los principales modelos existentes en el mercado, discriminado por tamaños y funcionalidades según la realidad nacional.
 - b) Comparación de dichos vehículos con relación a vehículos de combustión interna de similares características, realizando un análisis del Costo Total de Propiedad (TCO) de ambas alternativas.
- 6) Recomendaciones para la transición a vehículos eléctricos en la gestión de residuos domiciliarios, integrando elementos claves en función de los análisis realizados precedentemente.

Tareas principales de la consultoría

Para el cumplimiento de los objetivos generales de la consultoría se han identificado 9 tareas principales (ver Figura 1).

Tarea	Titulo
0	Gerenciamiento de Proyecto
1	Experiencia internacional
2	Experiencias locales
3	Análisis comparativo
4	Aspectos Tecnicos
5	Aspectos Economico-Financieros
6	Factibilidad Tecnico-Financiera
7	Recomendaciones para la transicion
8	Informe Final
9	Presentaciones

Figura 1 - Listado de tareas principales

El presente informe abarca las tareas 1 a 7.

En las siguientes secciones se detallarán los principales resultados encontrados de cada tarea.

4 Casos de estudio a nivel internacional

Se relevaron las experiencias regionales e internacionales más relevantes de adopción de vehículos eléctricos para la gestión de residuos domiciliarios. Para esto, se consideró la información disponible en la web y se mantuvieron entrevistas con referentes regionales para poder acceder a información de primera mano acerca del funcionamiento, evaluación y lecciones aprendidas de los proyectos de electrificación vehicular en la recolección de residuos que ya se encuentran en funcionamiento.

Se detectaron varias noticias acerca de experiencias piloto y proyectos que implican la implementación de estos VE, sin embargo, algunos informes detallados acerca de los resultados de la implementación y varios testimonios positivos sobre la operación de los vehículos.

En nuestra región, la experiencia más importante es la que se viene llevando adelante en algunas ciudades brasileras con camiones eléctricos de recolección de residuos de la marca BYD desde el año 2019, la cual se reseña más adelante.

Los múltiples proyectos piloto que se están desarrollando sobre la incorporación de camiones eléctricos a la recolección de residuos coincide con la preocupación creciente de los gobiernos locales por incorporar, en los usos más intensivos en energía y más previsibles en sus recorridos, vehículos amigables con el ambiente y que contribuyan a reducir las emisiones de gases, material particulado y emisiones sonoras.

Se resume a continuación diferentes experiencias en las que se hace foco en la electrificación de equipos pesados, sobre todo camiones recolectores, aunque se incluyen algunas experiencias regionales de otros tipos de vehículos eléctricos utilizados en la recolección de residuos.

México

En el trabajo *“Trayectorias tecnológicas y comerciales para la adopción de vehículos medianos y pesados de cero emisiones en México”* publicado por Calstart en enero de 2023 se estudia la situación actual y la proyección en la adopción de vehículos eléctricos en México.

En 2022 se vio una adopción relevante de vehículos medianos y pesados de cero emisiones (ZE-MHDV, por sus siglas en inglés) donde más de 1.690 vehículos medianos y pesados fueron adquiridos a nivel nacional en México. Los autobuses eléctricos pasaron de menos de 10 en 2021 a 36 en 2022.

México se encuentra bien posicionado para incrementar su participación de eléctricos, siguiendo objetivos internacionales. Los resultados muestran que México podría alcanzar 36% de ventas de ZE-MHDV para 2030, y apunta a 100% para 2040 en cinco de las seis categorías de vehículos analizadas, siendo la sexta categoría justamente la que contiene vehículos eléctricos para la recolección de residuos la cual se presenta con proyecciones de sus ventas de forma más lentas y tardías, comparado con otros vehículos medianos y pesados.

Porcentaje de nuevas ventas de ZE-MHDV por segmento vehicular, 2020-2050

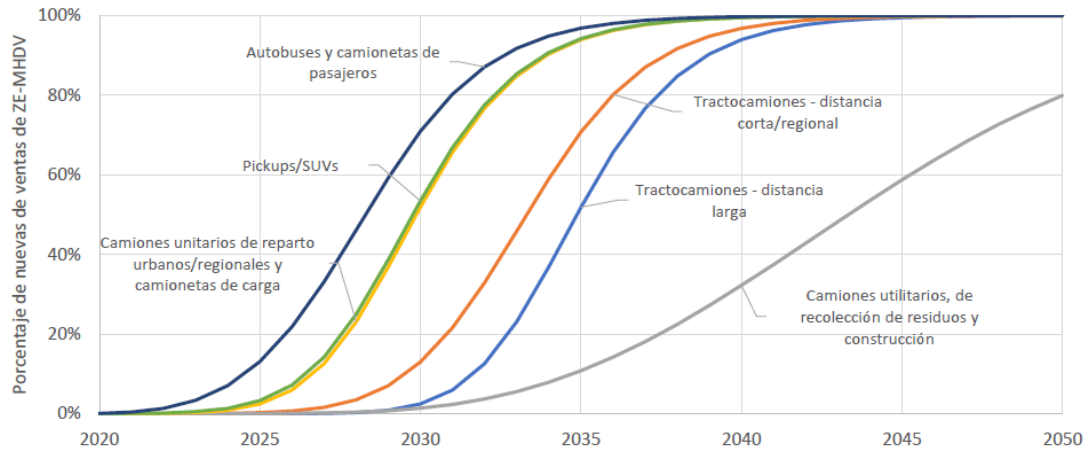


Figura 2. Principales segmentos vehiculares y su proyección de ventas hacia 2040. Fuente: Trayectorias tecnológicas y comerciales para la adopción de vehículos medianos y pesados de cero emisiones en México – CALSTART 2023

En la Figura 2 se aprecia que a partir del año 2030 es cuando comienza a notarse la inserción de los vehículos de recolección de residuos, llegando en 2050 al 80% de las ventas.

España

En España la empresa Irizar está trabajando junto con las autoridades municipales en la incorporación de VE para la recolección de residuos.

El Irizar *ie urban truck* es un camión eléctrico que fue presentados como una opción para dar respuesta a diferentes necesidades de este mercado y permite circular por ciudades y entornos urbanos con reducción de emisiones sonoras, contaminantes y un 50% menos de consumo energético que un vehículo convencional, según declara el proveedor de movilidad eléctrica. Además, algunas ciudades españolas tienen restricciones en cuanto a las emisiones permitidas, lo cual sería resuelto con la incorporación de estos vehículos de cero emisiones.

El Grupo está formado por seis marcas (Irizar, Irizar e-mobility, Alconza, Hispacold, Masats y Jema) que desarrollan su actividad productiva en 13 plantas de producción en España, Marruecos, Brasil, México y Sudáfrica a las que se suma un Centro propio de I+D.



Figura 3. Irizar ie urban track presentado en el 'Smart City Expo World Congress Barcelona'.

Los camiones tienen 9,2 metros de longitud y están equipados con baterías de 307 kWh, que aseguran energía para una jornada de trabajo completa. Están propulsados por un motor eléctrico de potencia máxima de 360 kW y disponen de una carga útil de hasta 9.140 kilos de residuos.

La cabina del camión ha sido diseñada para aplicaciones urbanas. Su capacidad es de cuatro personas con un escalón único, facilitando el acceso al vehículo. Tanto la baja posición del asiento del conductor y la amplitud de las lunas delanteras y laterales permiten un amplio ángulo de visión sobre otros vehículos, ciclistas, peatones y usuarios.

Según Europa Press, el responsable del proyecto "Irizar ie Truck", Josu Letona, ha señalado que "por sus múltiples detalles, específicamente diseñados para operar en entornos urbanos, como la cabina del camión, las cero emisiones o el escaso nivel de ruido, el Irizar ie Truck es un vehículo idóneo para circular por ciudades y áreas metropolitanas, lo que contribuye a una ciudad más limpia, segura y un entorno más sostenible para la ciudadanía donostiarra".

Irizar ha sido la empresa adjudicataria del suministro de 2 camiones eléctricos al Ayuntamiento de San Sebastián para la recogida de los residuos urbanos. De esta manera, la capital guipuzcoana se convierte así en la primera ciudad vasca en disponer de un camión "totalmente eléctrico" en su flota de recogida de la basura. Su llegada a San Sebastián se planificó para finales del año 2023.

Por otro lado, de acuerdo con lo publicado por Renault Trucks en junio de 2021, la empresa realizó una entrega del primer camión eléctrico de serie, a la compañía global de gestión medioambiental URBASER. El Renault Trucks D Wide Z.E., primero de estas características puesta en circulación en España, realiza su labor de limpieza y reciclaje en la ciudad de Barcelona, donde Urbaser presta servicios de recogida de residuos, limpieza viaria y de playas.

Este vehículo se produce en serie en las instalaciones del fabricante de Blainville-sur-Orne. Tiene dos motores eléctricos de potencia total de 370 kW y baterías de iones de litio de 200 kWh.



Figura 4. Renault Trucks D Wince Z.E. utilizado en Barcelona

Luego de las primeras experiencias piloto en Barcelona, a finales de 2022 se realizó una licitación para obtener un lote camiones eléctricos en la ciudad para tareas de limpieza y recolección de residuos. Se adjudicaron 73 camiones de la marca Renault a las empresas encargadas de estas tareas [1]. Se trata de diferentes modelos de carrocería específicos para distintas tareas: recolectores de carga trasera, carga lateral, cisternas de riego y baldeo, y cajas abiertas con grúa.

Estados Unidos

Nueva York

La subsidiaria de Volvo Group, Mack Trucks, anunció que el Departamento de Saneamiento de la Ciudad de Nueva York (DSNY) adquirió siete modelos recolectores de residuos Mack LR Electric, que operarán en cada uno de los distritos de Nueva York [2].

El fabricante estadounidense presentó el VE Mack LR Electric en WasteExpo 2018, anunciando sus planes de asociarse con la DSNY para realizar pruebas, cuando aún no había comenzado su producción en serie.

El Mack LR Electric tiene dos motores eléctricos de propulsión de 167 kW que con una potencia total de 448HP.

Cuenta con cuatro baterías de iones de litio NMC (óxido de níquel, manganeso y cobalto), que se cargan a través de un sistema SAE J1772 de 150kW. También cuenta con frenado regenerativo de tres modos para tener en cuenta la carga creciente del camión de basura a lo largo del recorrido y ayude a recuperar la energía de las frenadas de forma eficiente.



Figura 5. Camión de residuos eléctrico MACK de Volvo

El DSNY recibió un primer camión eléctrico como parte de una experiencia piloto, un Mack LR Electric, en setiembre del año 2020, comenzando pruebas en Brooklyn. Desde entonces, se evaluó la capacidad de carga útil, el frenado regenerativo y el rendimiento general en operación. Sin embargo, no se pudo acceder a los resultados de estas pruebas.

Luego se incorporaron 7 vehículos eléctricos en distintas zonas de la ciudad de Nueva York: Bronx, Brooklyn North, Brooklyn South, Manhattan, Queens East, Queens West y Staten Island. El departamento de saneamiento municipal de Nueva York es de los más grande del mundo y recolecta diariamente alrededor de 12.000 toneladas de basura y materiales reciclables.

Boston

WIN Waste opera 50 camiones de recolección de residuos en el estado de Massachusetts. La empresa recicla más de 354.000 toneladas de papel, plástico y metales y convierte más de 6,4 millones de residuos post-reciclados en energía.

Dos unidades del camión MACK LR Electric Clase 8 han comenzado a utilizarse en 2023, los cuales se abastecen de energía eléctrica producida por la basura. Estas unidades recolectan unos 114 m³ de desechos por día en las rutas de servicio de la ciudad de Boston. Se estima que estos camiones eléctricos, utilizando la energía de desecho pueden evitar cerca de 7.570 litros de Diésel por año [3].

Esta generación de Mack LR Electric, lanzados en marzo de 2022, similares a los utilizados en Nueva York, tienen una capacidad de baterías de 376 kWh, sus motores generan 448 HP. Tienen baterías de litio NMC compatible con una carga de 150kW y un frenado regenerativo de dos etapas.

El LR Electric tiene un peso total de 30 toneladas y la autonomía media es de aproximadamente 110 kilómetros.

Otras experiencias en Estados Unidos

La ciudad en Ocala, en el estado de Florida en 2020 ya anunciaba la incorporación de 5 camiones de recolección de residuos eléctricos a su flota de 50 camiones.

El precio de estos es de alrededor de 525.000 dólares cada uno, pero cuentan con una subvención, y esperan un ahorro del 78% en costos de combustible [4]. Los camiones son fabricados por BYD.

BYD anunció en 2020 que la ciudad de Hyattsville, Maryland, compró un camión de basura BYD 6R Clase 6, que será el primer vehículo eléctrico de batería y de cero emisiones para la recolección de residuos su tipo en el estado de Maryland [5]. El BYD 6R tiene un sistema de batería de 211 kWh y es capaz de trabajar un turno completo sin recargar.

En 2021 BYD junto con Hudson County Motors Inc., Sanitation Equipment Corporation y Climate Change Mitigation Technologies LLC anunciaron la entrega de 5 camiones de basura BYD a la ciudad de Jersey, Nueva Jersey [6]. Los camiones comenzaron a funcionar con normalidad.

La flota consta de dos camiones de basura BYD 8R que tienen una carrocería compactadora de 19 m³ y tres camiones de basura BYD 6R con una carrocería compactadora de 7,6 m³. El BYD 8R lleva una batería de más de 280 kWh y se puede recargar en dos horas y media con carga rápida. El BYD 6R tiene una batería de 211 kWh y una autonomía de 128km y se puede recargar en dos horas con carga rápida.

Dinamarca

En Dinamarca, se tiene especial cuidado en la separación y el reciclaje de residuos. Para 2024, la capital, Copenhague pretende reciclar el 70 % de sus residuos. Todo el país desecha los residuos en 12 tipos de contenedores.

Para buscar mejorar la gestión de residuos se están comenzando a incorporar vehículos de recolección de residuos eléctricos.

Esbjerg

A finales de noviembre de 2022 se introdujo el Mercedes-Benz eEconic en la ciudad Esbjerg.



Figura 6. Mercedes Benz eEconic operado por la empresa Marius Pedersen en Dinamarca.

La empresa Marius Pedersen se encarga de la recolección de residuos en Dinamarca hace más de 100 años. También opera en otros países como República Checa y Eslovaquia, con más de 4700 empleados y 500 camiones.

Mercedes Benz ha suministrado el eEconic 300 con 3 ejes, 3 baterías de iones de litio con una capacidad instalada de 336 kWh y una capacidad útil efectiva de 291 kWh a la ciudad de Esbjerg. Las baterías suministran corriente a dos motores eléctricos montados directamente en el eje propulsor y también accionan la unidad del compresor [7].

El eEconic puede recorrer hasta 150 km al día sin necesidad de recargarlo. Además, en 75 minutos la capacidad de la batería se puede cargar del 20 al 80 %, (potencia de carga máxima de 160 kW).

El vehículo, tiene sistemas de frenado asistido, cámaras para maniobrar, seguridad para las baterías frente a choques y otras características de seguridad. También se declara que tiene comodidades para los conductores y operarios, con una cabina para 4 personas, de fácil y buena visibilidad, entre otras prestaciones.

Comenzó su producción en serie en el sitio de Wörth, en el sur de Renania-Palatinado. El primer vehículo de producción en serie fue el entregado en Dinamarca [8].

Copenhague

En marzo de 2022 Scania anunció que entregaría un lote de 78 camiones de la Serie L totalmente eléctricos a Amager Ressourcecenter (ARC), empresa encargada de la recogida de residuos urbanos en la región de la capital danesa, Copenhague. Los dos primeros camiones del pedido se entregaron en diciembre de 2021, mientras que el resto de la flota estaba planificada para entregarse a lo largo de 2022 y en la primera mitad de 2023.

El proveedor ofreció una formación completa, servicio de standby y de mantenimiento según lo que declara el director general de ARC, Jacob Hartvig Simonsen [9].



Figura 7. Camión de recolección de residuos Scania utilizado en Copenhague

Esta experiencia inicia con un camión Scania modelo 25L, que comienza a operar a principio de 2023. El modelo es movido por un motor eléctrico y cuenta con una grúa y una compactadora también eléctricas.

La grúa es modelo Fassi de 24.5 t/m de 64kW con batería propia de 86 kWh. La compactadora es suministrada por la empresa Stiholt Hydraulic modelo NTM NG de 18m³.

El vehículo opera en Copenhague extrayendo los contenedores que se encuentran bajo el nivel de la calle. La grúa se encarga de extraer los contenedores y vaciarlos a la caja compactadora por la parte superior.

La capacidad de las baterías de los vehículos (sin incluir la grúa) es de 297 kWh y según reportan luego de 3 meses de uso, el camión logra realizar el recorrido diario y tener un remanente de 40% en las baterías [10].



Figura 8. Camión Scania eléctrico con grúa y compactadora eléctricas

Holanda

La empresa de transporte y contenedores Wielemaker BV, con sede en Middelburg, es el primer proveedor de servicios de limpieza de Holanda que utiliza un camión de recolección de residuos eléctrico. Este camión fue incorporado al sistema de recolección de residuos en la provincia de Zelanda, Holanda.

Fue incorporado a la flota 1 camión Mercedes-Benz eEconic como el utilizado en Dinamarca.



Figura 9. Camión de residuos Mercedes-Benz eEconic en Zelanda, Holanda

Según Jasper Wielemaker, el director técnico de la empresa de gestión de residuos, el caso es exitoso, operando con autonomía más que suficiente y con tecnología fiable [11].

La flota de la empresa cuenta con más de 70 vehículos de Mercedes-Benz y luego de la experiencia con el camión eléctrico, queda posicionada para continuar la transición e incorporar más vehículos eléctricos en su flota.

Alemania

Frankfurt

El servicio de limpieza de la ciudad alemana de Frankfurt recibió 6 camiones eEconic de Mercedes Benz, los cuales empezaron a operar en mayo de 2023 [12].

La empresa FES Frankfurter Entsorgungs utiliza el camión eléctrico de serie de Mercedes-Benz dentro de su flota para la recogida de residuos municipales en Frankfurt.



Figura 10. Camiones de recolección de residuos eEconic de Mercedes Benz en Frankfurt

Munich

En 2020, la empresa Volvo entregó el vehículo eléctrico para la recolección de residuos, modelo FE Electric, a la ciudad de Múnich, siendo el primer vehículo de serie totalmente eléctrico para este uso.

Munich Waste Management Company (AWM) es la empresa encargada de recolección de residuos y este es el primer camión totalmente eléctrico en Baviera. AWM es la empresa de eliminación de residuos de la capital bávara y es una de las empresas de eliminación de residuos municipales más grandes de Alemania. Su flota incluye alrededor de 250 vehículos pesados de 18 toneladas.

El Volvo FE Electric se utiliza para la logística de contenedores en los centros de reciclaje. Permite acomodar diferentes contenedores según las necesidades del servicio. Para este uso, el vehículo alcanza una autonomía de aproximadamente 120 kilómetros, utilizando cuatro baterías de iones de litio de 50 kWh cada una. El camión eléctrico se puede cargar con carga DC de hasta 150 kW.



Figura 11. Volvo FE Electric utilizado en Múnich

China

En febrero de 2022, ocho departamentos del gobierno central chino iniciaron conjuntamente un programa piloto urbano para la electrificación completa de la flota de vehículos públicos en todo el país, con un plan que se extiende desde 2023 hasta 2025.

Sin embargo, recientemente ha habido una disminución en el respaldo directo a los subsidios para la electrificación por parte del gobierno central, lo que podría ralentizar el proceso. El programa piloto tiene como objetivo lograr que el 80% de las nuevas adquisiciones de la flota pública en las ciudades participantes sean vehículos eléctricos. Esta categoría abarca vehículos gubernamentales, autobuses urbanos, vehículos sanitarios, taxis, vehículos de reparto de correo, vehículos de distribución y logística urbana, así como vehículos de aeropuerto. Además, el programa también establece objetivos específicos para las estaciones de carga.

Dentro del sector público, los vehículos comerciales medianos y pesados más utilizados son los vehículos sanitarios (66%), los autobuses urbanos (33%) y los vehículos de reparto de correo (~1%). En 2022, la proporción de vehículos eléctricos en el mercado de autobuses urbanos ya había alcanzado el 99,5%. Por lo tanto, es probable que el mercado de vehículos sanitarios sea el más afectado por el reciente anuncio de reducción en el apoyo gubernamental.

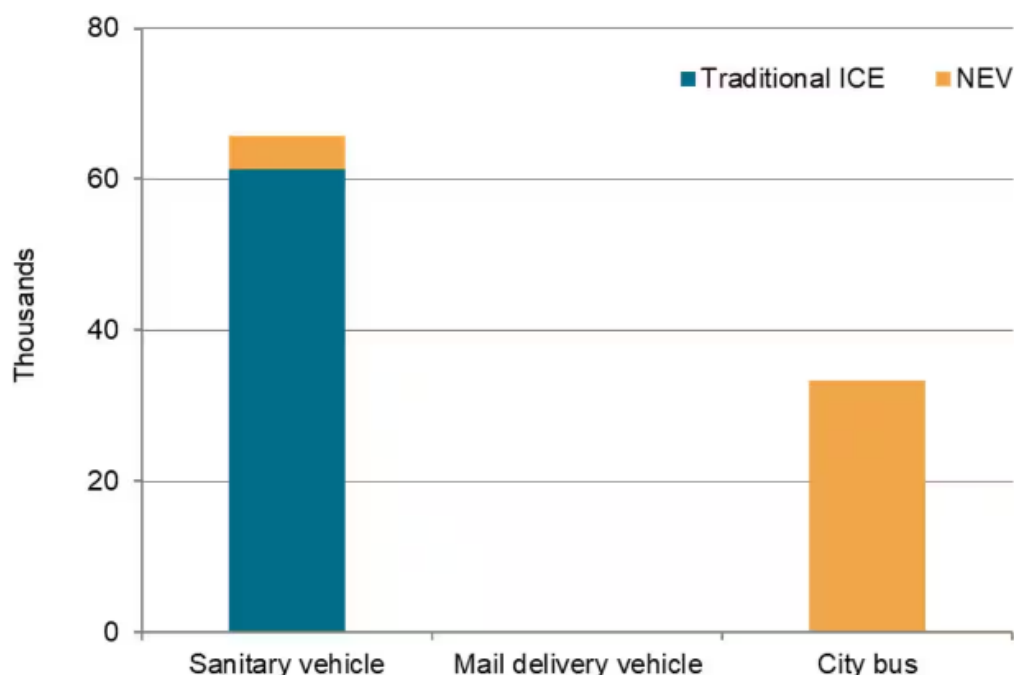


Figura 12. Proporción de vehículos pesados eléctricos y tradicionales en la flota pública [13]

Si bien la proporción de vehículos eléctricos en el sector de recolección y transporte de residuos en China aún en baja es de esperar que la adquisición siga aumentando y también así su participación en el mercado.

Ensayos internacionales

4.8.1 Oficina Federal de Energía de Suiza. Estudio de vehículo de 26 Toneladas. (año 2019)

El proyecto evaluó el uso de vehículos recolectores de reciclaje eléctricos en Suiza, examinando su rentabilidad e impacto ecológico. Se desarrollaron y probaron cuatro prototipos durante dos años (entre 1 de septiembre de 2017 al 1 de septiembre de 2019) en dos empresas municipales y dos privadas.

Como punto de partida se evaluó que, en el transporte de larga distancia, los camiones de cero emisiones no son competitivos con los de motor de combustión. Sin embargo, los vehículos eléctricos de recolección de residuos recorren trayectos más cortos, donde la electrificación es ventajosa. Sus rutas limitadas y definidas permiten calcular con precisión el consumo de energía y el tamaño de la batería. Los viajes en vacío, comunes en la logística de residuos, mejoran la autonomía al no usar carga útil constantemente. Además, las paradas frecuentes para recoger materiales reciclables benefician a los motores eléctricos, que recuperan energía al frenar y permiten una aceleración rápida y silenciosa. Además, el funcionamiento silencioso reduce las emisiones de ruido en áreas residenciales sensibles.

Las condiciones marco del proyecto fueron:

Logística de residuos:

- Los ciudadanos exigen una recogida y eliminación de residuos limpia, fiable, rentable y ecológica.

- Municipios y ciudades son responsables de estos servicios, que incluyen la recogida, transporte y tratamiento de residuos.
- Los contratos públicos evalúan "idoneidad práctica", "precio" y "garantía, servicio y medio ambiente".

Empresas privadas de logística de residuos:

- Municipios pueden subcontratar servicios a empresas privadas o asociaciones especializadas.
- Requisitos similares para vehículos, con énfasis en la eficiencia económica y ambiental.
- En Zúrich, la higiene del aire es crucial, con un 20-40% de la puntuación de adjudicación basada en estándares de emisiones.

Seguridad y ergonomía:

- Personal levanta 3-8 toneladas de residuos al día y sube/baja del camión 300-400 veces.
- Cabinas de piso bajo y umbrales de carga profundos reducen carga física.
- Vehículos deben cumplir normas técnicas y ser silenciosos y libres de emisiones.

Requisitos de autonomía:

- El vehículo de recolección de residuos debe cubrir al menos 112 km diarios, considerando distancias en vacío.
- Mayor consumo en áreas urbanas debido a la densidad de recogida.

Mercado de logística de residuos en Suiza:

- Ventas anuales de 70-110 vehículos de recogida de residuos.
- Fluctuaciones debido a nuevos estándares de emisiones.
- Vida útil de vehículos entre 8-12 años, hasta 15 años en casos excepcionales.

Estado del arte:

- No había soluciones completamente eléctricas de 26 toneladas en Suiza al inicio del proyecto.

En cuanto al vehículo, se detallan a continuación las características del Futuricum Collect 26E, vehículo diseñado y producido para este proyecto:

Chasis:

- Elección del chasis: El chasis Volvo fue seleccionado para el Collect 26E debido a su alta calidad y aceptación en el segmento premium.
- Apoyo de Volvo: Volvo proporcionó acceso limitado a horas de trabajo y datos del protocolo CAN.

Estructura de residuos comprimidos del vehículo:

- Fabricante de carrocerías: Contena-Ochsner AG fue elegida por su experiencia en la industria y compatibilidad con el camión eléctrico.

- Eficiencia energética: La estructura de la prensa es alimentada por una bomba hidráulica eléctrica que reduce el consumo de energía y ruido, permitiendo compactar basura durante la conducción.

Concepto de sistema para todo el vehículo:

- Fuente de energía: El vehículo utiliza baterías como única fuente de energía, operando sin emisiones y cargándose durante la noche.
- Diseño del propulsor: Incluye una caja de cambios colectiva, cuatro motores eléctricos, inversores y un cargador, con un diseño modular para facilitar el montaje.

Transmisión:

- Criterios de diseño: Mantenimiento del diseño del chasis, eliminación de cambios de marcha, modularidad, redundancia y bajo peso.
- Desempeño: El sistema proporciona suficiente par para pendientes del 12% y una velocidad máxima de 86 km/h.
- Redundancia: Cuatro motores eléctricos conectados en paralelo aseguran continuidad en caso de falla de uno de ellos.

Desarrollo:

- Motores eléctricos: Se utilizaron cuatro motores del BMW i3 adaptados para vehículos comerciales, logrando un par máximo de 1.000 Nm.
- Optimización: Relación de transmisión ajustada para eficiencia y durabilidad, con la lubricación de los cojinetes mejorada para prolongar la vida útil de la caja de cambios.

Concepto de seguridad para todo el vehículo

- Protección al abrir componentes de alto voltaje: Utilización de un circuito de enclavamiento en serie para interrumpir el suministro de 24V si se abre la tapa de un componente, separando el circuito de alto voltaje del tren motriz.
- Medición constante del voltaje: El sistema de control del vehículo mide el voltaje del circuito de bloqueo para determinar si el círculo está cerrado.
- Interrupción de suministro eléctrico: En caso de interrupción, se abren los contactores de las baterías de alto voltaje y el circuito se descarga a menos de 60V en un segundo.
- Parada de emergencia: Interruptor de parada de emergencia en el habitáculo, conectado en serie con el enclavamiento y los contactores de la batería.
- Desconexión del enchufe de batería: Los contactores de la batería se abren al desconectar el enchufe, evitando acceso a piezas de alta corriente.

Concepto de refrigeración y aire acondicionado

- Climatización en verano e invierno: Compresor de aire acondicionado eléctrico y calefacción de alto voltaje, con calefacción eléctrica en el parabrisas para descongelación rápida en invierno.

- Control de temperatura de baterías: Válvula de conmutación y calentador de alto voltaje controlan la temperatura de las baterías durante la carga en invierno.
- Refrigeración activa: No utilizada actualmente debido al bajo calentamiento de la batería durante el uso; se consideraría para aplicaciones con mayor rendimiento.

Selección de tecnología de batería

- Experiencia previa: Basada en proyectos anteriores de Designwerk GmbH y Batteriewerk Schweiz AG.
- Requisitos de capacidad y rendimiento: Modularidad y redundancia fueron claves, con baterías divididas en dos cajas y cadenas individuales para continuidad en caso de fallos.
- Calidad y confiabilidad: Se prefieren productos de serie, como células redondas de alta densidad de energía.
- Evaluación de químicas alternativas: LiFePo4 evaluada pero descartada por su vida útil más corta y menor número de ciclos posibles.

Especificaciones de las baterías:

- Capacidad: Dos baterías de 360V nominales y 135 kWh cada una, con un total de 270 kWh por camión.
- Refrigeración y calefacción por agua: Asegura una mayor duración de la batería con temperaturas operativas entre -25 y 50 grados centígrados.
- Durabilidad: Baterías con al menos 4500 ciclos completos.

En cuanto al sistema de gestión de batería (Battery Management System: BMS) utilizado en el camión eléctrico recolector de reciclaje, se resume a continuación los puntos más importantes:

Desarrollo del BMS:

- Se enfrentaron desafíos para encontrar un BMS adecuado para baterías de camiones.
- Batteriewerk Schweiz AG colaboró con Munich Electrification GmbH para desarrollar un BMS específico.
- La función maestro/esclavo del BMS combina parámetros de las cadenas individuales de la batería.

Funciones del BMS:

- Mide corriente, temperatura y voltaje para monitoreo y seguridad.
- Controla la carga del vehículo y limita corrientes y voltajes.
- Ofrece detección de colisiones y equilibrio de celdas para mantener uniformidad en la carga.

Equilibrio de Celdas:

- Utiliza equilibrio pasivo para igualar la carga entre las celdas.
- Este método se prefirió sobre el equilibrio activo debido a la calidad de las células y la baja necesidad de equilibrio.

Cumplimiento y Seguridad:

- Basado en un BMS existente que cumple con la norma ISO 26262 para garantizar seguridad funcional.
- Permite ajustes en hardware e interfaz del vehículo y ofrece una interfaz para el control del vehículo.

Tecnología de Carga:

- Utiliza un cargador a bordo de 22 kW para convertir corriente alterna en continua.
- Protegido contra corrientes excesivas con fusibles y controlado por la unidad de control del vehículo.

Registro y Prueba de Vehículos:

- Sometido a pruebas de inspección de vehículos, frenos, dirección y normativas eléctricas.
- Requiere pruebas de compatibilidad electromagnética y FACT para aprobación.

Seguimiento de Vehículos:

- Utiliza dispositivos de registro de datos mediante protocolo CAN para transmitir datos relevantes a la nube.
- Los datos se analizan utilizando analizadores y aplicaciones de código abierto para evaluaciones de eficiencia y rentabilidad.

Desarrollo de Hardware y Cableado:

- Se utiliza una red de alta tensión de 360 V CC para componentes de potencia.
- El cableado se organiza en forma de estrella con conexiones enchufables para facilitar el mantenimiento.

Desarrollo de Baterías:

- Las baterías se colocan entre el primer y segundo eje del camión para una instalación fácil.
- Se realizan pruebas de estabilidad mecánica y estanqueidad para garantizar la seguridad.

Desarrollo de Software:

- Se simulan señales de sistemas eliminados, como el motor diésel, para asegurar el correcto funcionamiento de los sistemas de asistencia y pantallas.
- El software de control se ejecuta en una unidad de control montada en el módulo de accionamiento.

Luego de 2 años de operación del proyecto piloto, se evaluaron los resultados y se realizaron encuestas a las partes involucradas en el mismo. Como resultado se muestran las distintas opiniones.

Experiencia operativa después de dos años:

- Mejoras en la conducción gracias a la caja de cambios de 1 etapa y la falta de cambios de marcha.

- Cuatro incidentes de problemas técnicos resueltos en 24 horas.
- Considerado el más fiable de la flota de vehículos de recogida.

Ventajas del vehículo:

- Muy tranquilo, contribuyendo a la salud de los empleados y al entorno.
- Bajo consumo de energía y uso de energía renovable.
- Conducción fina y bajo consumo de neumáticos.
- Gran carga de retorno al recuperar energía de frenado.
- Eficiencia energética que ahorra tiempo en el trabajo diario.
- Óptima gama de aplicaciones y recarga fácil de baterías.
- Alto nivel de confort de conducción.

Desventajas:

- Desafíos en la eliminación o uso de materiales básicos de las baterías.
- Requisitos ideales para vehículos de recogida, pero pueden ser desventajosos en otras aplicaciones.

Opiniones de la empresa:

- Orgullo por la adquisición del vehículo y su contribución al desarrollo positivo.
- Consideración de expansión en la flota si los costos de inversión se reducen.

Percepción de la población:

- Transeúntes notaron la ausencia de ruido del motor diésel y la facilidad para mantener conversaciones durante la operación del vehículo.

Como resultado del estudio se llegó a las siguientes conclusiones:

- Los datos de conducción confirmaron que los vehículos cumplen los requisitos de autonomía, reducen la contaminación acústica y reciben comentarios positivos.
- A pesar de los altos costos iniciales, los menores costos de mantenimiento se verificaron en la práctica, aunque los componentes eléctricos de alto voltaje aumentaron algunos gastos. En dos años, los costos de mantenimiento fueron ligeramente inferiores a los de un vehículo diésel, y uno de los prototipos fue el más fiable.
- Las colaboraciones con Volvo Schweiz y ContenaOchsner AG se han fortalecido y seguirán siendo clave en el futuro. Los prototipos redujeron las emisiones de ruido y CO₂, beneficiando al medio ambiente y a los residentes.
- El proyecto llevó a la creación de Designwerk Products AG, que continúa desarrollando vehículos comerciales eléctricos. Los costos de producción de un vehículo de recolección de residuos eléctrico han disminuido entre un 10 y un 15%, y el interés de la población en estos vehículos ha aumentado.
- En base a las mejoras en las tecnologías de las baterías a lo largo de los años, una vez terminado el proyecto, el mismo vehículo podría tener una mejora en la capacidad de las baterías con 340 kWh en lugar de 270 kWh manteniendo las mismas dimensiones.

4.8.2 ¿Hacia una electrificación de la recogida de residuos Municipales? Tesis Maestría de Medio Ambiente, Universidad de Sherbrooke, Canadá. (año 2020)

El objetivo del ensayo es analizar los beneficios ambientales y económicos de la electrificación del transporte en la recolección de residuos en Quebec. Quebec ha adoptado medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, y la electrificación del transporte es una de ellas. El transporte representa más del 40% de las emisiones provinciales. Aunque varios municipios han elaborado planes de acción, pocos han tomado medidas concretas en la recolección de residuos. Los camiones de recolección diésel consumen mucho combustible y generan emisiones durante las paradas y arranques.

El análisis de varias tecnologías muestra que la electrificación es la mejor opción para Quebec, reduciendo los costos operativos en más del 50% y utilizando la electricidad con una huella de carbono baja. Además, mejora la salud y la calidad de vida al ser menos ruidosa y con menores emisiones de sustancias nocivas.

Concluyendo, la electrificación de la recolección es clave para que los municipios reduzcan sus emisiones. Sin embargo, actualmente solo es viable en contextos urbanos. Para aprovecharla, es necesario enfocarse en la planificación de rutas y el compromiso político. El autor recomienda incluir cláusulas ambientales en las licitaciones y establecer ordenanzas municipales sobre emisiones contaminantes para promover el uso de combustibles alternativos al diésel en la recolección.

El propósito de este estudio fue examinar los beneficios medioambientales y económicos de las nuevas tecnologías de recolección de residuos en entornos municipales.

Para alcanzar este propósito, el autor definió cuatro subobjetivos.

- El primero buscó recopilar información sobre los recursos energéticos disponibles en Quebec, así como las tecnologías de recolección actualmente en uso, incluyendo los diversos tipos de camiones y su eficiencia energética.
- El segundo subobjetivo evaluó los beneficios ambientales y económicos de cada tecnología en el contexto municipal y regional. Para esto, se usó el camión diésel con volquete hidráulico como referencia.
- El tercer subobjetivo se centró en identificar los requisitos logísticos, técnicos y normativos para la implementación exitosa de camiones totalmente eléctricos.
- Por último, el cuarto subobjetivo buscó formular recomendaciones para la progresiva integración de tecnologías limpias en los procesos de recolección de residuos en Quebec.

Se detalla a continuación información obtenida del ensayo realizado.

La recolección de residuos es un sector de transporte con baja eficiencia energética debido a la gran cantidad de paradas y arranques que implican sus rutas. Aunque se optimizan las rutas, los vehículos de recolección consumen mucho combustible, especialmente porque se van cargando durante el recorrido, lo que aumenta la energía necesaria para futuras paradas y arranques. La eficiencia de combustible de un camión recolector diésel se estima en alrededor del 10%.

El consumo de combustible varía según el tipo de circuito y el camión, desde aproximadamente 50 a 140 litros cada 100 kilómetros, dependiendo de la distancia entre las paradas y el estilo de

conducción. La velocidad media de recogida es de 15 km/h, considerando las múltiples paradas y arranques.

La implementación de la recolección inteligente, que utiliza contenedores equipados con microchips para optimizar rutas, podría reducir el consumo de combustible al realizar paradas solo cuando los contenedores están llenos. En promedio, un camión recolector diésel recorre unos 200 km por día, emitiendo entre 1 y 2 kgCO₂eq por kilómetro recorrido, además de otras partículas contaminantes debido a la combustión de hidrocarburos y el desgaste de las piezas del camión. Estos impactos varían según el uso y el tipo de camión.

Contaminante	Emisiones (gCO ₂ eq por km recorrido)
CO ₂	1577,4 g/km
NO _x	4,38 g/km
PM	0,01 g/km
SO ₂	0,048 g/km
CO	1,32 g/km
HAP	0,72 g/km
COV	2,19 g/km

Tabla 1 - Emisiones de contaminantes por km recorrido de camión de recolección diésel

Un camión recolector tiene un costo inicial de alrededor de 250.000 dólares y se espera que dure aproximadamente 10 años, con unas 2.000 horas de uso anual (8 horas durante 251 días laborables). El mantenimiento anual se estima en unos 6.700 dólares, y el costo total por kilómetro es de USD 1,97, siendo el combustible la mayor parte de este costo.

Los criterios de evaluación y ponderación fueron seleccionados para reflejar la realidad de la recolección y transporte de residuos, clasificándolos en ámbitos económicos, ambientales y sociales. Se establecieron 11 criterios considerando aspectos como las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes atmosféricos. La ponderación se realiza en una escala del 1 al 5, reflejando la importancia de cada aspecto para los municipios en diferentes contextos urbanos, suburbanos y rurales. Se analizaron aspectos como la inversión inicial, los costos operativos, los impactos en la salud humana y el medio ambiente, así como la percepción pública de la tecnología utilizada.

Como conclusiones del ensayo se realizaron recomendaciones para lograr mayor electrificación de los vehículos de recolección de residuos:

- **Incorporación de Cláusulas Medioambientales en las Licitaciones:**

Revisar los modelos de licitación para incluir criterios ambientales, premiando a los recolectores privados que usen combustibles alternativos y prácticas eco-responsables. Esto incentivaría comportamientos más sostenibles en el sector.

- **Implementar Ordenanzas Municipales:**

Limitar las emisiones de contaminantes nocivos en grandes centros urbanos prohibiendo la circulación de camiones diésel en el centro, como ya se hace en algunas ciudades europeas. Esto promovería el uso de tecnologías menos contaminantes.

- **Transparencia en los Datos de Consumo:**

Hacer públicos los datos de consumo de combustible y emisiones de GEI de los servicios de recogida para informar a los ciudadanos y fomentar prácticas más sostenibles.

- **Incentivar el Uso Eficiente de los Contenedores:**

Instruir a los ciudadanos a sacar sus contenedores solo cuando estén llenos para reducir el tiempo de trabajo de los camiones, el consumo de combustible y optimizar las rutas de recogida.

- **Agrupación de Servicios de Recolección:**

Analizar la posibilidad de agrupar los servicios de recolección entre municipios adyacentes para optimizar las distancias recorridas y mejorar la eficiencia ambiental de las rutas.

Como conclusiones se menciona que el municipio de Quebec ha sido optimista respecto a los acuerdos internacionales sobre el clima, pero en 2020, el objetivo de reducción de GEI aún no se ha cumplido, especialmente en el sector del transporte que depende del petróleo. Para combatir el cambio climático, el Gobierno de Quebec ha implementado subsidios para tecnologías limpias, como el programa Ecotrucking. En 2019, varios municipios elaboraron planes de acción para reducir GEI, pero pocos abordaron las emisiones de la recolección de residuos, posiblemente por falta de información y empresas con tecnologías limpias. Este estudio llena ese vacío proporcionando datos económicos y ambientales sobre el uso de combustible verde en la recolección de residuos, ayudando a los gestores municipales a tomar decisiones informadas.

Los resultados muestran que la electrificación de la recolección de residuos ofrece ventajas económicas y reduce las emisiones de GEI. Sin embargo, la tecnología aún no ha sido probada ampliamente en municipios, y su adopción es complicada. Los subsidios gubernamentales son esenciales, pero es necesario que tanto empresas privadas como municipios adopten progresivamente camiones más limpios.

Futuras investigaciones deben enfocarse en los datos de consumo y desafíos de los camiones eléctricos, así como en la huella de carbono de la producción y reciclaje de baterías de iones de litio, considerando todo el ciclo de vida de las tecnologías de recolección.

Experiencias regionales.

A continuación, se describen dos casos de experiencias regionales a las que se tuvo acceso directo a los participantes para realizar una entrevista.

Chile

El Grupo Enel es una empresa multinacional de energía que opera en 29 países, entre ellos Chile, en donde cuenta con experiencia generada a partir de dos proyectos piloto. Se concretó una entrevista con representantes de la empresa para conocer su experiencia en el tema.

Cuentan con un proyecto que busca probar las capacidades operacionales y de rendimiento de los camiones eléctricos para la recolección de basura y sus capacidades constructivas para trabajar en las mismas condiciones de un camión convencional a diésel de similares características, para lo cual se incorporaron dos camiones recolectores eléctricos.

En los últimos meses del año 2023, y en conjunto con el operador de recolección STARCO, dos camiones eléctricos comenzaron a trabajar en el servicio de recolección y transporte de residuos domiciliarios, en dos comunas de Santiago de Chile: Vitacura y Colina. Uno de los camiones está siendo utilizado para la recolección de residuos reciclables y el otro para residuos orgánicos. Esta experiencia de 6 meses tiene como objetivo evaluar el uso de estos vehículos, y si es positiva, se incorporaría el uso de estos en las siguientes licitaciones. Los dos camiones en uso, a partir de abril 2024 pasarían al operador contratado por la municipalidad.

Estiman que cada camión eléctrico reducirá aproximadamente 34 toneladas de CO₂ al año, dada la media de 24.771 km recorridos en una ruta promedio de servicio.

Para conocer la experiencia se mantuvieron reuniones con Claudia Peña, Head of Sales B2G de Enel X, y la ingeniera Magdalena Camino, Referente Business Development Enel X, eCity.

Los camiones que necesitaban para este tipo de servicio, incluyendo caja compactadora y con las características que se requerían, no se desarrollaban en Chile. Identificaron camiones de origen chino, pero no tenían servicio de post venta ni soporte en Chile. También identificaron camiones del tipo requerido fabricados por marcas europeas, pero sus precios eran muy elevados, duplicando los precios de los camiones chinos.

Tenían además algunas restricciones locales que dificultaban la incorporación de los camiones disponibles en el mercado internacional. Por ejemplo, todos los camiones con la capacidad de carga que necesitaban y con compactadora tenían 3 ejes. Sin embargo, la normativa local impide circular en zonas urbanas a vehículos con 3 ejes.

En función de lo anterior, decidieron seleccionar un proveedor para el camión (Maxus) y un referente local para la caja compactadora (PESCO), y trabajando en equipo con ambos llegar a un vehículo que se adaptara a sus necesidades. Su costo total aproximado osciló en USD 220.000, un precio que estiman muy inferior a adquirir los camiones armados. El proceso de integración del camión con la caja tuvo desafíos técnicos que llevaron aproximadamente 1 año para solucionarlos y poner los camiones en marcha.

Por las características del chasis del camión seleccionado, no pudieron incorporar la caja de 19m³ que es la que se utiliza normalmente en estos servicios y debieron instalar una de 15m³. El utilizar las baterías a modo mochila, les dio el contrapeso que les permitió estirar el chasis y están buscando alternativas para poder instalar la de 19m³.



Figura 13. Camiones de recolección de residuos eléctricos de Enel X. Chile

Los camiones cuentan con baterías de 314 kWh y una autonomía estimada de aproximadamente 250 km con el camión cargado y un uso máximo del 80% de la capacidad de la batería. Se adjunta la ficha técnica del camión y de la caja compactadora.

Un aspecto que consideran muy sensible y fue central es que la toma de fuerza funcionara correctamente para poder compactar. Para resolverlo y realizar la correcta configuración optaron por llevar a Chile un técnico desde China.

Cuentan con un cargador de 150 kW, que como rara vez los camiones retornan con menos del 50% de la carga, demoran menos de una hora en recargarlos. El cargador que disponen les permite cargar simultáneamente los dos vehículos, con el proporcional aumento en el tiempo de carga.

Manifiestan no haber tenido problemas de autonomía, ya que sus recorridos oscilan entre 100 y 110 kilómetros, que requiere entre 4 y 5 horas aproximadamente para realizarse. Uno de los camiones se usó para reciclables, y luego se utilizó para residuos orgánicos. Al momento no hay una operativa fija porque están en período de pruebas.

Observaron que el rendimiento es muy sensible al uso del aire acondicionado. El hecho de no tener un intercomunicador entre la cabina y el fondo genera que viajen con la ventana abierta, exigiendo el aire acondicionado y aumentando el consumo energético. También resultó sensible al tipo de manejo, en particular el uso del embrague y los frenos. Aun así, observaron una muy sensible reducción tanto en el costo operativo como de mantenimiento, así como mucho menos roturas y por ende menores costos y tiempos de reparación.

Previo a iniciar un servicio de este tipo, consideran que es necesaria la capacitación de choferes y demás funcionarios sobre electromovilidad, frenos regenerativos, mecánica básica y uso general de los vehículos eléctricos.

Respecto a ajustes mecánicos que identificaron tras iniciar la experiencia, señalan que, en función del monitoreo que realizan, debieron reconfigurar los frenos para reducir el desgaste.

A la fecha, no fue posible acceder a informes sistematizados con la evaluación de la experiencia.

Brasil

En las ciudades brasileras de Río de Janeiro y San Pablo hay operando número importante de vehículos eléctricos abocados a la recolección y transporte de residuos. Desde hace unos pocos años, esta flota incluye 29 camiones eléctricos con carga trasera y compactadora.

Empresa	Cantidad de camiones
CORPUES	20
COMULRB	2
CLEAN	1
TB GREEN	6

Tabla 2. Camiones recolectores eléctricos con compactadora en San Pablo y Río de Janeiro. Fuente: Elaboración propia en base a entrevista con Carlos Roma



Figura 14. Camión de recolección de residuos utilizado en Brasil

En 2022 parte del equipo consultor mantuvo entrevistas con el Ing. Marcio de Almeida D'Agosto, Coordinador del Programa de Logística Verde y con el Ing. Carlos Roma, director general de TB Green, una de las empresas que incorporó 6 camiones eléctricos de recolección de residuos.

En el marco de esta consultoría, se retomó el contacto y se mantuvo una nueva entrevista con Carlos Roma, a efectos de ampliar y actualizar la información sobre la experiencia específica con los 6 camiones mencionados.

TB Green es una empresa de desarrollo de soluciones limpias, que incluye la generación de energía sustentable, infraestructura de carga de vehículos eléctricos, alquiler y operación de vehículos eléctricos. Posee una de las mayores flotas de vehículos eléctricos de Brasil destinada a transporte mercadería. El ingeniero Carlos Roma, su director general, fue anteriormente director de Ventas de BYD Brasil. A continuación, se describen los conceptos más relevantes mencionados sobre la experiencia con los camiones de recolección de residuos eléctricos.

Los camiones que utilizan son BYD del modelo T8, con cajas compactadoras de 17 metros cúbicos de la marca Usimeca, desarrollados específicamente para ese modelo y de acuerdo a los requisitos establecidos por TB Green en función de las características del servicio que brindan.

Se manifestó extremadamente conforme con el desempeño de los camiones. Son robustos, se rompen poco y requieren un mantenimiento muy inferior a los camiones convencionales. En su experiencia, el costo de mantenimiento es de aproximadamente un 35% al de un vehículo diésel equivalente (65% de ahorro).

La economía de la unidad, en lo que hace al costo energético y al mantenimiento, fue comprobada. Manifestó obtener un consumo de menos de 1 kWh/km. En este sentido, señaló que el entrenamiento del conductor es muy importante, que un conductor entrenado consume 35% menos de uno que no lo está. Según el tipo de manejo, el consumo puede variar entre 0,8 y 1,3 kWh/km. Es fundamental el entrenamiento sobre el uso de los frenos, para poder aprovechar la energía cinética y potencial. En ese sentido, señaló el mejor desempeño que suelen tener las mujeres conductoras, tanto por ser más conscientes de las instrucciones y cuidadosas de los vehículos. Y puso como ejemplo a DHL, que en una flota de vehículos eléctricos de reparto de mercadería solo utiliza conductoras mujeres.

Utilizan baterías de 218 kWh, que utilizando hasta el 80% les brinda una autonomía de aproximadamente 180 km, lo que resulta más que suficiente para las rutas que realizan. No han requerido realizar cargas intermedias durante los turnos, resolviendo la operación con cargas nocturnas. No han tenido aún inconvenientes con las baterías y estiman que su vida útil superará los 10 años.

No han tenido inconvenientes con las cajas, pero si es muy crítico con la posventa de estos camiones y la disponibilidad de piezas y repuestos para minimizar tiempos muertos. Este ha sido el principal escollo para brindar el servicio eficientemente. En función de ello han tenido que generar stocks de repuestos, así como establecer un canal directo para importar piezas y repuestos desde China y no depender del representante de BYD en Brasil.

Por último, hizo hincapié en la importancia de la telemetría, en poder medir y tener la mayor información posible, de las características del trabajo, de los vehículos y de los procesos carga. Indicó que esta información les ha permitido realizar ajustes, adaptar la operativa, mejorar el desempeño, e incluso negociar con BYD y con el Estado. Con relación al proceso de carga, ejemplificó que llegaron a detectar en un cargador una pérdida de hasta el 15% de la energía entre lo que salía de la red y lo que cargaba la batería.

Comentarios finales

En el mercado internacional las experiencias de vehículos eléctricos para la recolección de residuos son incipientes. Si bien hay variados ejemplos de su implementación, estos son recientes y, en la mayoría de los casos, corresponden a pocas unidades introducidas en las flotas.

Los casos analizados tienen pocos años y aún no hay disponibles reportes y análisis específicos de su desempeño. De todas formas, algunas declaraciones de los prestadores de este tipo de servicios indican conformidad respecto al desempeño de los vehículos.

5 Relevamiento y evaluación de experiencias locales.

Existen muy pocas experiencias nacionales en movilidad eléctrica asociadas al servicio de recolección de residuos, todas muy acotadas, muy recientes, y por ende sin evaluaciones sistematizadas que permitan extraer grandes conclusiones. No existen experiencias locales en la incorporación de equipo pesado dedicado a la recolección de residuos. En la totalidad de los casos, las experiencias existentes se encuentran asociadas a servicios de menor exigencia y requerimientos de los equipos, como son los servicios de recolección de materiales reciclables que se realizan con camiones eléctricos de caja simple, o sea camiones de transporte general.

Para poder identificarlas y caracterizarlas, se realizaron tres acciones:

- Relevamiento de información en prensa y documentos oficiales
- Envío de cuestionarios a los responsables de los servicios vinculados a la recolección y transporte de residuos de los 19 departamentos del país
- Entrevistas con los responsables de los servicios que pudo identificarse tenían algún tipo de experiencia con las características buscadas

Las experiencias nacionales que pudieron identificarse corresponden a las Intendencias de Canelones y Rocha, que han incorporado camiones livianos sin compactadora, y la incorporación de algunos motocarros eléctricos en varias localidades a lo largo del país.

CANELONES

El departamento de Canelones es quien cuenta con la experiencia más relevante en la incorporación de vehículos eléctricos a los servicios de recolección de residuos.

Para conocer mejor la experiencia se realizó una entrevista con autoridades y técnicos de la Intendencia. Participaron por parte de la comuna, Leonardo Herou Director General de Gestión Ambiental, Leonardo Riet coordinador de manejo de Flota, y Alejandro Lagarreta Coordinador del Área de Reciclaje, todos ellos de la Dirección General de Gestión Ambiental,

A principio de 2023 se incorporaron los primeros 5 camiones eléctricos livianos, con caja cerrada de 17 metros cúbicos de capacidad de carga, sin compactadora, de marca JAC modelo 1063 EV1 (se agrega ficha técnica en el Anexo). Actualmente cuentan con 7 y apuntan a llegar a 12 o 13, lo que les permitiría resolver con este tipo de vehículos toda la recolección de residuos reciclables, tanto intradomiciliarios como desde los Ecopuntos. Alguno de los camiones que faltan para alcanzar el objetivo planteado se incorporarán a la brevedad en el Plan Vale [14].

Además, hay 3 contratos con empresas privadas que gestionan la recolección de residuos en algunas zonas del departamento (La Paz, Las Piedras y Ciudad de la Costa, entre otras). Cada una de estas empresas, en acuerdo con la Intendencia, acaban de incorporar un camión eléctrico idéntico a los adquiridos por la comuna, pero en todos los casos, con menos de 1 año de experiencia y sin tener aún evaluaciones comparativas con los vehículos convencionales similares.



Figura 15. Ilustración de camión JAC modelo 1063 EV1

Previo a esta definición, desde la Intendencia relevaron experiencias de vehículos eléctricos, como la de Cuctsa o de empresas privadas como Pepsico y analizaron recorridos y autonomías. También consultaron las opciones existentes dentro de las distintas marcas, relevaron la tecnología existente en el mercado, y en función de ello definieron los requisitos técnicos para la licitación.

Como resultado de la licitación, recibieron una única propuesta por parte de la marca JAC, con los camiones mencionados y a un costo por vehículo de USD 55.000 incluyendo cargador. Destacan que tuvieron particular atención en la disponibilidad de repuestos, y que en este caso los repuestos, salvo en lo referido a la batería, freno y suspensión, son los mismos que los camiones Diésel del mismo modelo, que abundan en el mercado.

Para su incorporación, debieron redefinir los circuitos de recolección de residuos de forma de adaptarse a las autonomías y tiempos de carga de los vehículos, e irlos ajustando en función de la experiencia.

Partieron con la expectativa de una autonomía superior a los 200 kilómetros y un tiempo de carga de 0 a 100% de la batería de 7 horas. Si bien la autonomía se ajustó a lo previsto, resultó muy variable según el uso del aire acondicionado, la velocidad de desplazamiento, entre otros factores. Los camiones tienen un modo de uso económico que aumenta el rendimiento de la batería, y si bien limita la velocidad a 60 km, se adecúa a las velocidades requeridas y permitidas en zonas urbanas

La velocidad de carga en cambio resultó menor a la esperada, lo que los llevó a incorporar cargadores más potentes, lo cual les requirió además instalaciones especiales.

El uso de los camiones es muy variable, depende las zonas, la temporada, etc. A modo de ejemplo, en temporada alta, en Ciudad de la Costa, un camión empieza el turno a las 5hs y regresa aproximadamente a las 13hs, con una carga de entre el 50% y 60% de la capacidad de la batería. Se le da una carga rápida y está disponible para salir nuevamente en caso de ser requerido, sobre las 17hs. Sin embargo, en otro día, trabaja 8 horas, para que el conductor almuerce y vuelve a salir haciendo un nuevo turno, y regresando a la base con un 20% o 25% de carga en la batería. Un turno medio tiene en promedio un recorrido de 100 a 120 kilómetros.

Entienden que el modelo incorporado es adecuado, es ágil para el desplazamiento en zonas urbanas y su capacidad de carga es buena.

La evaluación que realizan de la tecnología es muy positiva. El mantenimiento que requiere, en comparación a los vehículos tradicionales, es muy básico, cada mucho kilometraje y muy rápido de hacer. A modo de ejemplo, un camión diésel nuevo, con el kilometraje que suelen darle, requiere 5 servicios al año de mantenimiento preventivo para cambios de aceites, filtros y fluidos. El camión eléctrico en su primer año solo requirió un servicio para mantenimiento de la garantía, que fue realizado en el día en taller del concesionario. Observaron también que los vehículos se rompen menos. Durante el primer año, ninguno de los vehículos eléctricos entró a taller.

Consultados por la posibilidad de incorporación de vehículos eléctricos de otro tipo en el resto de la flota, manifestaron que, si bien han conversado y superficialmente evaluado la posibilidad de incorporar camiones recolectores eléctricos, en lo que queda del período no ven condiciones políticas ni presupuestales como para avanzar en este sentido

Más allá del momento, entienden que se requieren algunas certezas que hoy no tienen. Herou manifestó que está convencido que se debe avanzar, pero con cautela, incorporando estos vehículos, pero a modo de prueba piloto, en una zona manejable, de forma de poder evaluar la experiencia para, si resulta conveniente y ofrece las garantías suficientes, expandir la flota gradualmente.

Como ya se mencionó, la Intendencia tiene contrato con 3 empresas privadas mediante los cuales tercerizó parte de los servicios de recolección y transporte de residuos. Se le consultó a Herou si estos contratos limitan hasta su vencimiento la posibilidad de incorporar nuevos vehículos eléctricos en estos servicios. Éste manifestó que la Intendencia tiene todas las herramientas en los contratos para ir incorporando los cambios en los servicios que entiendan necesarios, entre ellos la incorporación de vehículos eléctricos.

En el caso de las empresas tercerizadas que prestan servicios de recolección de residuos en Canelones, se contactó a una de ellas, la empresa CIEMSA, manteniéndose una reunión con el Ing. Martín Galán, Gerente de Servicios de CIEMSA y los Ings. Matías Ferrari y Sergio Pereira quienes son los encargados de la operación del servicio de recolección de residuos.

El contrato que se encuentran ejecutando, tiene una duración total de 8 años de los cuales acaba de finalizar el primero. Durante el mes de diciembre del 2023 incorporaron un camión eléctrico JAC de iguales características a los ya incorporados por la Intendencia de Canelones.

Por el tiempo transcurrido no han realizado aún una evaluación sistemática del desempeño de esta unidad, pero manifiestan que se adecúa bien a los requerimientos del servicio de recolección de reciclables.

Como perspectiva futura, entienden que aún no están dadas las condiciones para la incorporación de vehículos eléctricos en los segmentos más exigentes como los son los camiones pesados por las exigencias operativas de este tipo de servicio y el elevado consumo energético que requieren, junto a la poca experiencia que existe en su uso para este tipo de servicios. No obstante, será estudiado al momento que requieran renovar la flota.

ROCHA

Se mantuvo una reunión con Ramón Lorente, Director de Gestión Ambiental de la Intendencia de Rocha y con Ana Laura Pereyra Ing. Hidráulica-Ambiental, asesora en la Dirección de Gestión Ambiental de la Intendencia.

En el marco de la Licitación Pública 5/2022, cuyo objeto fue la contratación de servicios de recolección, transporte y logística de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Rocha y balnearios, se exigió a las empresas oferentes incluir un camión eléctrico para recoger residuos reciclables, con un volumen de carga mínimo de 10m3.

Esta licitación fue adjudicada a TGA, cuyo principal accionista es la empresa TEYMA. El camión, marca BYD de 4 toneladas, comenzó a ser utilizado entre noviembre y diciembre de 2023, ya que según la empresa le demoraron la entrega. La gestión de este, su carga y mantenimiento lo realiza la empresa. Desde la Intendencia no tienen datos sobre la evaluación de este y desde Teyma manifestaron que su incorporación aún era muy reciente como para poder sacar conclusiones al respecto. No realizaron una evaluación previa, ya que en cualquier caso debían adquirirlo por ser una exigencia del pliego. Sin embargo, estiman que si se hubiese evaluado es posible que la evaluación económica fuera negativa. Esto es así ya que la conveniencia la asocian al plazo del contrato, que en este caso es muy corto, aunque con opción de ser renovado.

En el mes de abril en la Intendencia esperaban firmar un acuerdo en la marco del Plan Vale para la compra de equipamiento vinculado a la recolección de residuos reciclables. Podrían comprar 3 camiones y estaban evaluando adquirirlos eléctricos de características similares al que opera TGA, para el mismo tipo de servicio.

MOTOCARROS ELÉCTRICOS

En el marco del programa Localidades Eficientes de la Dirección Nacional de Energía del MIEM, varias intendencias han incorporado desde 2022 triciclos eléctricos, en su mayoría durante 2023. Entre otras localidades, se encuentran Goñi, Illescas, Pintado, Maciel, Reboledo, Mendoza Grande y Mendoza Chico de Florida, Belén y Mataojos en Salto, Batlle y Ordoñez en Lavalleja, Santa Clara del Olimar y Villa Sara en Treinta y Tres y Aiguá en Maldonado.

El modelo ha ido cambiando, pero la mayoría y más recientes se trata de motocarros o triciclos eléctricos con volcadora y capacidad de carga de 1.000 kilogramos. Los usos que se le han dado son diversos, entre los cuales se encuentra el transporte de materiales y herramientas o recolección de podas. En algunos casos como los de Treinta y Tres o Lavalleja, en notas de prensa o sitios webs oficiales, se mencionó que se destinarían a recolección y transporte de residuos.



Figura 16. Motocarros eléctricos

Recientemente, la Intendencia de Montevideo incorporó 2 motocarros eléctricos donados por PNUD, ambos destinados a tareas de limpieza y recolección de residuos, uno de los cuales está abocado a la limpieza del Parque Rodó y sus entornos.

No fue posible coordinar reuniones con los responsables de los servicios para obtener más información al respecto.

6 Evaluación de ventajas y desventajas del uso de vehículos eléctricos en la recolección y transporte de residuos domiciliarios.

La evaluación de las ventajas y desventajas de la electrificación de la flota se realizó teniendo en cuenta los procesos ya iniciados de electrificación en otras flotas como pueden ser los ómnibus, los taxis y los vehículos utilitarios, extrayendo sus lecciones aprendidas e identificando los puntos críticos del proceso. Se complementó por entrevistas a actores calificados, así como por la experiencia adquirida del equipo consultor en estos procesos.

Se consultaron las fuentes secundarias de información que se han generado en el país sobre los procesos de electrificación de la movilidad, sus ventajas y desventajas. En particular, nos referimos a la Guía sobre Movilidad Urbana Eléctrica en Uruguay [15], y, sobre todo, a los Informes que se han producido en el marco del proyecto de la Universidad de Montevideo financiado por el Fondo Sectorial de Energía (FSE) de la ANII [16], que cuenta con una metodología para comparar los costos durante todo el ciclo de vida de camiones convencionales y eléctricos. Si bien no está aplicado a flota de recolección de residuos, que tiene sus especificidades y sus rendimientos particulares, es una buena referencia para contrastar una diversidad de costos e inversiones.

Los vehículos eléctricos, en términos generales, presentan un conjunto de ventajas en comparación con los vehículos a motorización convencional, dentro de los cuales pueden mencionarse algunas externalidades positivas, que benefician a la sociedad en su conjunto, como pueden ser los beneficios ambientales, así como beneficios privados asociados a la disminución de costos operativos.

Por otro lado, los vehículos eléctricos requieren una mayor inversión inicial y la construcción de infraestructura dedicada para la recarga vehicular. Dependiendo del uso del vehículo, también puede haber afectaciones en su disponibilidad puesto que es necesario que los vehículos permanezcan inactivos mientras recargan sus baterías, lo cual lleva un mayor tiempo que el relleno del depósito de combustible de los vehículos a combustión.

Estas consideraciones de orden general se analizaron específicamente para los vehículos utilizados en la recolección de residuos. Se consideraron las características de los distintos tipos de vehículos que se evaluarán, sean estos camiones pesados y livianos, recolectores, camionetas y vehículos de apoyo a la operación, etc.

Se presenta más abajo un resumen identificando las principales ventajas y desventajas que pueden identificarse en los procesos de electrificación del transporte.

Beneficios de los vehículos eléctricos.

Los vehículos eléctricos, en términos generales, presentan un conjunto de beneficios en comparación con los vehículos a motorización convencional, los cuales se desarrollan a continuación.

Reducción de emisiones de gases contaminantes

Los vehículos eléctricos no generan ningún tipo de emisión local ya que no emiten material particulado (nocivo para la salud, sobre todo en entornos urbanos), así como tampoco gases de efecto invernadero.

Los vehículos a diésel, y en mayor medida los camiones, producen emisiones de gases contaminantes, como dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), partículas sólidas y otros compuestos orgánicos volátiles (COV).

La reducción en las emisiones que genera sustituir un vehículo diésel por uno eléctrico depende de las características del vehículo sustituido, la tecnología de emisiones utilizada, las condiciones de operación y mantenimiento y las condiciones de conducción.

Sin embargo, en la medida que los vehículos eléctricos utilizan electricidad para sus desplazamientos, puede haber emisiones de gases en la generación de la energía eléctrica necesaria, por lo cual el desempeño ambiental de estos vehículos depende, en última instancia, de cuáles son las emisiones de gases asociadas a la generación de electricidad. En el caso del Uruguay, la generación eléctrica tiene un alto componente renovable y sin generación de emisiones. Durante el año 2022, el 91% [17] de la generación de electricidad se realizó en base a energías renovables, con lo cual el país se asegura que el funcionamiento de los vehículos eléctricos se realiza prácticamente sin generar emisiones. Para el año 2023, se estima que el porcentaje de generación eléctrica basado en energías renovables fue del 91,2%. Incluso estos guarismos de participación de las energías renovables en la generación total están entre los menores de los últimos años por la sequía histórica por la cual atravesó el país.

Este es un diferencial muy grande del país con respecto a otros de la región que están apostando a la movilidad eléctrica. Por ejemplo en Chile, líder regional en introducción de ómnibus eléctricos, durante el año 2022, solo el 55% [18] de la energía eléctrica generada, lo fue en base a fuentes renovables.

Menor contaminación acústica

El tráfico representa una de las principales fuentes de contaminación acústica en núcleos urbanos. La sustitución de vehículos convencionales por vehículos eléctricos implica un beneficio relevante en este sentido. El ruido originado por la propulsión de los vehículos es sensiblemente menor en un vehículo eléctrico que en uno con motor a combustión. Y el impacto es más significativo aún con vehículos operando a baja velocidad, con frenadas y reinicios de marcha frecuentes y en vehículos de mayor porte, como es el caso de la recolección de residuos domiciliarias en centros urbanos. Esto toma mayor relevancia al considerar que buena parte de la operación se realiza en horario nocturno, cuando las personas descansan, haciendo más valorable la reducción de la contaminación sonora.

Puede trazarse un paralelismo con los ómnibus de transporte de pasajeros. En ambos casos, se trata de motores de relativamente elevada potencia y con una operativa que implica ciclos de detención, aceleración, desaceleración y circulación a velocidades bajas y en distancias cortas. En el año 2021 se publicó, en el marco del Proyecto MOVÉS, el Estudio comparativo sobre el nivel de ruido generado por el transporte público convencional y eléctrico [19].

A modo de resumen, se concluye que la diferencia del Nivel de Presión Sonora entre vehículos eléctricos y convencionales, son muy significativas cuando están detenidos, acelerando o circulando a bajas velocidades (<30 km/h), tanto dentro como fuera de las unidades.

En cuanto a ruido exterior, dice que “las diferencias son muy significativas a velocidades bajas y convergen a medida que aumenta la velocidad, principalmente por encima de 50 km/h. La diferencia

entre las dos tecnologías es muy significativa también para los escenarios de vehículos detenidos y vehículos acelerando entre 0 y 25 km/h”

Respecto a ruido interior, “La percepción del cambio asociada con las diferencias entre ambas tecnologías serían importantes y obvias a velocidades menores a 30 km/h, perceptibles entre 30 y 40 km/h, y poco perceptibles o nulas a partir de 40 km/h según escalas típicas de percepción de diferencia de sonidos.”

Además de las emisiones sonoras durante la marcha, debe considerarse también la reducción de ruido durante la compactación y el levantado de los contenedores. Durante estos procesos de altos requerimientos de potencia alimentadas por el motor, el cual en los casos de motores a combustión elevan sus revoluciones, generando emisiones en decibeles considerables.

Estos efectos positivos de la electrificación de los vehículos favorecen tanto a los trabajadores que se encuentran operándolos, como a todas las personas usuarias de la vía pública o residentes de las zonas por donde circulan, en tanto todos ellos se exponen a una menor polución sonora.

Soberanía energética.

La introducción de vehículos eléctricos contribuye a aumentar la soberanía energética del país, ya que se pasa de consumir un energético importado, y sobre el cual el país no tiene control alguno en su precio y disponibilidad, como es el caso del petróleo, a un energético cuya fuente es nacional y cuyo costo es determinado en base a contratos fijos de suministro a largo plazo (PPA para el caso de biomasa, solar y eólica).

Eficiencia energética.

En términos de la energía total consumida, los vehículos eléctricos presentan una mayor eficiencia, lo cual se expresa en un menor consumo energético total por kilómetro recorrido u hora trabajada.

La cuantificación exacta de este diferencial requiere un análisis más detallado, y depende incluso de cuál es la fuente de generación de la energía eléctrica, puesto que, en la determinación de la eficiencia de un vehículo eléctrico, también influye el modo como se genera la electricidad, siendo mayor la eficiencia cuanto más renovable sea el mix de fuentes de generación eléctrica.

Según los datos que se muestran en la siguiente figura, el vehículo convencional de gasolina con motor de combustión interna, tiene una eficiencia global del 25%, desaprovechándose el 75% restante (por rozamientos dentro del motor o en la tracción o los propios factores termodinámicos limitadores del rendimiento en los motores de explosión) mientras que en el caso del vehículo eléctrico, las estimaciones muestran una eficiencia del 77% si la electricidad utilizada tiene un origen 100% renovable.

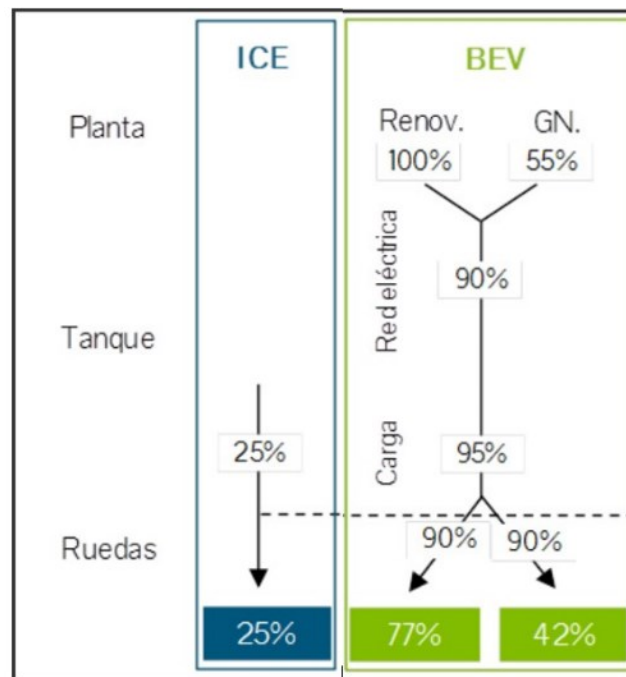


Figura 17 - Comparación entre la eficiencia energética de un vehículo convencional y uno eléctrico. [20]

Estabilidad de costos.

Junto con la mayor independencia energética comentada en el punto anterior, se encuentra también la mayor estabilidad de costos que tienen los vehículos eléctricos en comparación con los vehículos convencionales.

El costo energético de los vehículos convencionales depende del valor del petróleo, el cual es uno de los precios más volátiles que existen, y el cual depende, además, de situaciones geopolíticas que están fuera del control del país.

Puede verse las oscilaciones históricas del precio del petróleo durante los últimos años, lo cual repercute en la variación del costo energético de los vehículos convencionales.

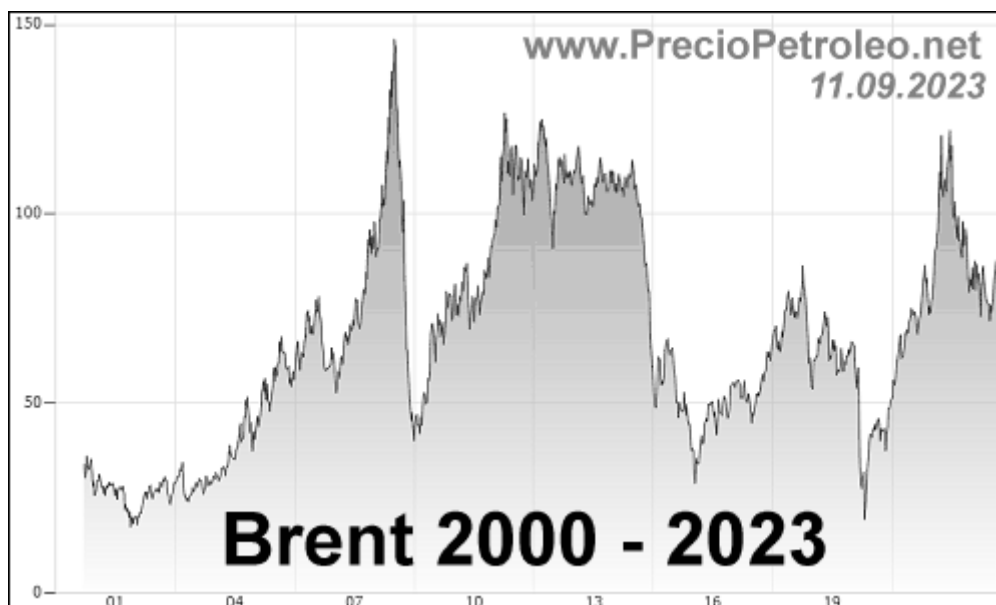


Figura 18. Evolución precio petróleo 2000 – 2023 Fuente: www.preciopetroleo.net

En contraste con esto, los vehículos eléctricos presentan un comportamiento de estabilidad de costos operativos puesto que el energético que consumen, la electricidad, es generada en el país en base a fuentes renovables como el agua, el viento y el sol, cuyos precios no dependen de la evolución del precio del petróleo y cuya estabilidad está asegurada por contratos a largo plazo.

En el siguiente gráfico se muestra la evolución del precio real del Gas Oil y del costo real del kWh para un promedio de la tarifa industrial MC1 en los últimos 4 años. Como puede observarse, el precio del Gas Oil llegó a caer más de 10% en los primeros 15 meses considerados, para luego aumentar más de un 46% en los siguientes 13 meses y volver a caer un 30% en los 12 meses posteriores. En contraste, el precio del kWh mostró una tendencia a la baja sin grandes oscilaciones.

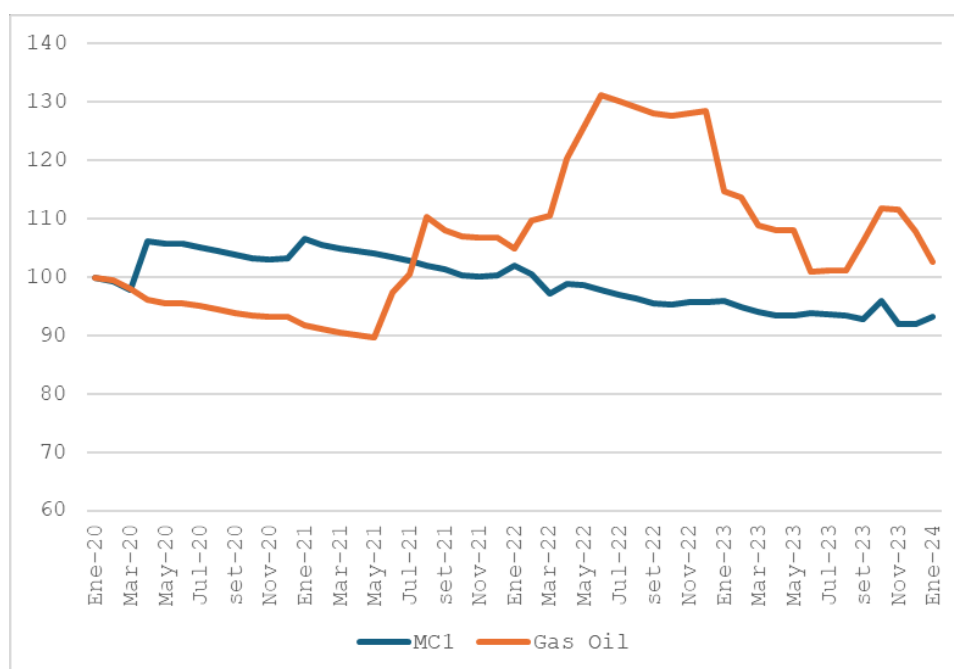


Figura 19. Índices de precio real al público de electricidad y Gas Oil (ene2020 – ene2024). Fuente: Elaboración propia en base a datos del MIEM

Incluso aunque el costo de la energía eléctrica no fuera tan estable, en el caso de los vehículos eléctricos el costo relevante es el de la compra del vehículo, siendo tanto el costo energético como el de mantenimiento, marginales. De este modo, el factor relevante en la estructura del costo total de propiedad de un vehículo eléctrico son las condiciones financieras para adquirirlo, lo cual otorga a este un horizonte de previsibilidad de costo a largo plazo. Esta situación es la opuesta a los vehículos convencionales, en particular los de uso intensivo, ya que el factor relevante dentro del costo total de propiedad es el costo del combustible, que por lo mencionado anteriormente es muy inestable y genera incertidumbre en el mediano y largo plazo.

Mejora de la calidad del servicio y condiciones laborales.

Los servicios prestados con vehículos eléctricos, en especial aquellos que se brindan en entornos urbanos, son percibidos por los usuarios como servicios de mayor nivel de calidad. También implican mejores condiciones laborales para los conductores.

Lo anterior se debe a la ausencia de emisiones de gases por parte de estas unidades, así como la disminución de ruidos y vibraciones con respecto a las unidades tradicionales, lo cual beneficia tanto a los usuarios del servicio (en el caso de los vehículos de transporte público), a los residentes de la zona en donde el mismo se presta, así como a los trabajadores que deben operarlos.

El conjunto de estos atributos genera una imagen de modernidad e innovación que mejora la opinión de los usuarios sobre el servicio que se está prestando mediante vehículos eléctricos.

Salvando las diferencias en el tipo de servicio, puede tomarse como referencia la percepción de los usuarios del servicio de transporte metropolitano sobre la incorporación de ómnibus eléctricos y su comparación con vehículos diésel, incluso con aquellos nuevos y con similares prestaciones.

Dentro del Proyecto Movés, se realizó una encuesta a usuarios para medir su satisfacción con las condiciones de movilidad de los ómnibus, y en particular la comparación de la experiencia entre ómnibus eléctricos y diésel, en el Área Metropolitana de Montevideo [21].

Los resultados reflejaron una evaluación muy positiva de las unidades eléctricas. Y si bien estos vehículos implicaban una mejora en la experiencia de viaje en aspectos vinculados directamente a las características de las unidades, como lo son la accesibilidad, la información dentro del ómnibus o la marcha, el factor más determinante en la preferencia por las unidades eléctricas fue el ambiental, la gente quiere ómnibus que no contaminen.

Los usuarios expresaron mayor satisfacción con los ómnibus eléctricos, 63% los prefiere, frente a un 7% que prefirió los buses a combustión.

Entre los motivos de preferencia por los eléctricos, el principal fue el impacto ambiental, el 42% los prefirió porque no contaminaban o contaminaban menos. En segundo lugar, el 25% dio como motivo principal de su preferencia por los ómnibus eléctricos que su motor es más silencioso.

Menor necesidad de mantenimiento y menos roturas

Los vehículos eléctricos son mecánicamente más simples y tienen menos componentes. La simplicidad del sistema de transmisión reduce la posibilidad de fallos mecánicos y simplifica el mantenimiento.

Los motores eléctricos tienen menos piezas móviles, por lo que hay menos componentes sujetos a desgaste. No requieren cambios de aceites, filtros y correas, que en el caso de los motores a combustión obligan a mantenimientos periódicos. El menor desgaste aumenta la vida útil de este tipo de motores.

El sistema de frenos regenerativos con que cuentan los vehículos eléctricos genera un menor uso del sistema de frenado tradicional, reduciendo la necesidad de cambiar pastillas y discos de freno.

Todo esto deriva en menores necesidades de mantenimiento, en mantenimientos más simples y en menor probabilidad de roturas. En un mismo período de tiempo o para recorridos similares, los vehículos eléctricos requieren menos servicios de mantenimiento preventivo y experimentan menos desperfectos mecánicos que los camiones convencionales.

La valoración monetaria de la reducción en los costos de mantenimiento se realizará más adelante cuando se desarrolle la evaluación económica. Pero es importante destacar que los vehículos eléctricos ingresan significativamente menos a taller, deben ser parados con bastante menos frecuencia y por tanto, están disponibles más tiempo para ser utilizados en los servicios.

Por ejemplo, para el caso de los camiones eléctricos adquiridos por la Intendencia de Canelones para el servicio de recolección de residuos reciclables, durante el primer año de actividad los camiones eléctricos tuvieron 1 mantenimiento preventivo mientras que, para el mismo período, los camiones convencionales requirieron 5 paradas técnicas para efectuar cambios de fluidos, filtros, etc.

Beneficios económicos.

Además de los beneficios más conocidos, como los energéticos y ambientales, los vehículos eléctricos tienen al cabo de la vida útil una serie de beneficios económicos, en comparación a los vehículos convencionales.

Esta afirmación no es cierta para todos los usos de vehículos, pero si es posible afirmar que en los segmentos de vehículos con un uso intensivo, la ecuación económica es conveniente, como se desarrollará y profundizará más adelante, en el siguiente entregable de la consultoría.

El beneficio económico viene dado por dos factores, el menor costo energético y el menor costo de mantenimiento.

El menor costo energético del vehículo eléctrico depende de diversos factores, de la coyuntura de precios de la energía, del vehículo particular al cual se refiera (vehículos pesados, livianos, de carga, de pasajeros, etc.), de la intensidad y condiciones de uso, de la tarifa contratada y el horario de carga, entre otros factores. Más adelante se definirán escenarios que reflejen las condiciones en que operan hoy las flotas convencionales de recolección de residuos en el país y se estimarán los costos operativos de una flota eléctrica equivalentes.

En el punto anterior se explicitaron los motivos que hacen a un menor costo de mantenimiento de los vehículos eléctricos frente a los convencionales.

En el país, además de los beneficios reseñados, existen diversos incentivos a la incorporación de vehículos eléctricos en las flotas, que pasan desde la exoneración o reducción de impuestos y tasas hasta el régimen promocional para inversiones en movilidad sostenible a través de la Ley de Inversiones. Sin embargo, estos instrumentos se encuentran disponibles para flotas que son propiedad de privados y no para aquellas flotas públicas propiedad de las Intendencias o Municipios.

Disponibilidad de Torque máximo a bajas y cero revoluciones por minuto

La siguiente tabla muestra la curva de par motor contra revoluciones por minuto típicas para un vehículo con motor eléctrico:

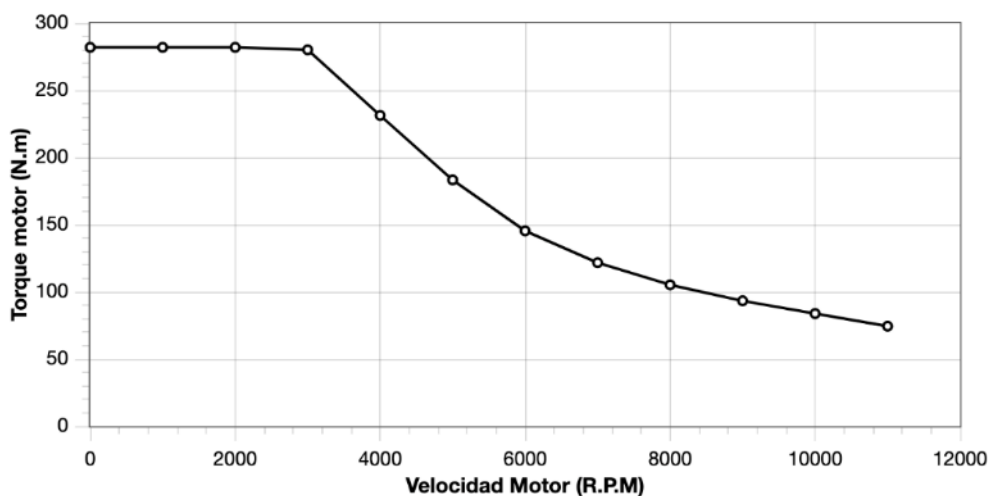


Figura 20. Fuente: Elaboración propia en base a valores típicos

Se aprecia en la Figura 20, que un vehículo eléctrico puede entregar el par máximo del motor a bajas revoluciones del motor, haciéndolo también a cero revoluciones por minuto y se mantiene constante hasta ciertas revoluciones del motor.

Por otro lado, puede verse en la siguiente grafica que el caso de un motor a combustión interna es sensiblemente diferente:

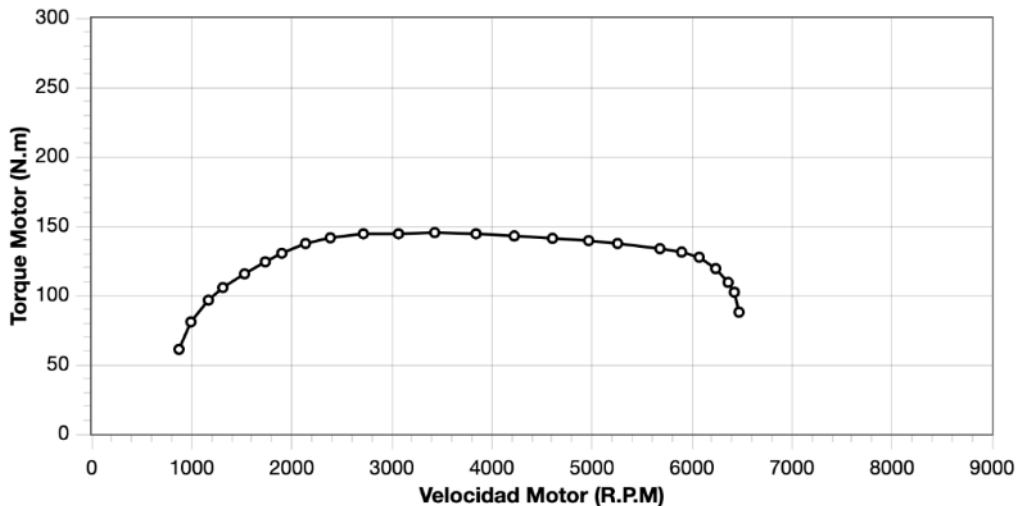


Figura 21. Fuente: Elaboración propia en base a valores típicos

En ese caso, para llegar al torque máximo el motor debe llegar a un rango determinado de velocidad y por debajo de determinadas revoluciones el motor no puede funcionar siendo necesario que el motor siempre esté funcionando al menos a una velocidad mínima (ralentí).

Esta diferencia hace que los vehículos eléctricos tengan una respuesta más rápida y arranques mucho más suaves tanto en horizontal como en pendientes en comparación con los de combustión interna. Esto mejora la eficiencia del vehículo y facilita la conducción sobre todo para aplicaciones como las de recolección de residuos con muchas paradas y arranques.

Desventajas de los vehículos eléctricos.

En cuanto a las desventajas asociadas a la utilización de este tipo de vehículos, podemos mencionar las siguientes:

Mayor inversión inicial.

La incorporación de vehículos eléctricos debe evaluarse en función del Costo Total de Propiedad (CTP), que incorpora entre otras cosas el costo de adquisición de los vehículos, las inversiones en infraestructura de carga, los costos de operación y los costos de mantenimiento, entre otras variables.

No obstante, los vehículos eléctricos tienen un costo de adquisición inicial superior, y junto con el costo asociado a las inversiones en infraestructura de carga, pueden transformarse en un obstáculo para su incorporación.

Aún en el caso que estos vehículos tengan un menor CTP, si la empresa u organización que evalúe incorporarlos tiene limitaciones en el acceso al financiamiento, esto puede transformarse en una dificultad para su concreción.

Escasez de proveedores y opciones de equipos.

La escasez de proveedores es una desventaja en comparación con la compra de un vehículo convencional. Si bien es cierto que en los últimos años se ha incrementado la oferta de vehículos eléctricos en todos los segmentos, no se alcanza todavía la variedad de proveedores existentes en el segmento convencional, lo cual redundará en menores opciones al momento de elegir los vehículos. Esto es un factor más crítico cuanto más especializado es el equipo utilizado, como puede ser el caso de equipos utilizados en exclusiva en la recolección de residuos.

En el caso del sector de recolección de residuos, en todo lo que es flota liviana y de apoyo, como pueden ser camiones pequeños, camionetas y utilitarios, existen ya varias opciones de marcas y proveedores para considerar por ser vehículos de uso extendido, pero en el equipamiento más pesado y específico, como el caso de los camiones recolectores con caja compactadora y los camiones volcadores, las opciones de proveedores y modelos, si bien es creciente en el tiempo aún son más acotadas.

Riesgos en la cadena de suministro de repuestos.

Existe el riesgo de que puedan ocurrir inconvenientes con el servicio de posventas, propio de un equipamiento que aún no se encuentra estandarizado. Hay varias acciones mitigadoras de este riesgo como ser, en el caso de los camiones compactadores, poder conseguir algún proveedor regional de un elemento crítico como lo son las cajas compactadoras, apostando a un ensamblaje regional de modo de facilitar la obtención de piezas y repuestos. Este fue el caso de la experiencia más exitosa de la región que es la de los camiones recolectores BYD en Brasil cuya caja compactadora es del proveedor brasileño Usimeca, el cual realizó un desarrollo a medida para el camión T8 de BYD. Otra acción, complementaria a la anterior, es generar un canal directo de importación desde el país de origen en forma directa con el fabricante.

Necesidad de generar infraestructura propia para la recarga.

La utilización de vehículos eléctricos de uso general puede satisfacerse mediante la utilización de la infraestructura pública de cargadores que se ha estado generando, y que continuará en desarrollo en los próximos años. Sin embargo, esto no es posible cuando al analizar el funcionamiento de flotas pesadas, como pueden ser ómnibus, camiones u otros, los cuales requieren de una infraestructura especializada, que incrementa el costo de la inversión inicial por la necesidad de cargadores, y eventualmente si la flota es grande, subestaciones, predios, etc.

Autonomías limitadas, tiempo de carga y disponibilidad

Los vehículos eléctricos no tienen disponibilidad completa de utilización durante el 100% del tiempo. Esto es así ya que en general, la tecnología utilizada es a través de una batería de tamaño que en general asegura, o se acerca a las necesidades diarias de utilización, pero requiere tiempos de recarga de algunas horas diariamente. Las horas de recarga dependen del tamaño de la batería, así como de la potencia de los cargadores y del propio suministro de electricidad.

Esto puede transformarse en un factor crítico para aquellos vehículos que deben realizar rutas extensas que puedan superar la autonomía, y sobre todo en aquellas flotas intensivas en utilización,

como por ejemplo la que presta servicio en los mayores centros poblados del país como Montevideo, y su área Metropolitana, Maldonado y Punta del Este, etc. El caso más crítico es el de Montevideo, cuya flota es operada en forma directa por la Intendencia de Montevideo, y donde algunos de los camiones que operan trabajan en régimen de tres turnos con poco margen para que los vehículos estén paralizados durante varias horas para realizar la carga.

Algunos modelos de camiones de recolección (como por ejemplo los de levante lateral) tienen grandes requerimientos de energía, lo que puede significar que las autonomías de los vehículos disponibles no sean suficientes para cubrir los circuitos de recolección que actualmente se realizan con camiones convencionales, pudiendo requerir el redimensionamiento de estos.

En otros casos los camiones de recolección de residuos deben recorrer mucha distancia cuando deben proveer el servicio en alguna localidad pequeña y alejada de la base de operaciones. Las realidades locales son muy variadas, pero pueden existir casos que requieran recorrer hasta 200km solo de rutas (entre ida y vuelta) para atender un servicio particular.

Este es un tema central que se retomará y profundizará más adelante.

Escasa experiencia internacional en flotas eléctricas de recolección de residuos

Otra desventaja es la relativa baja experiencia de estas tecnologías en servicio real a nivel mundial a lo largo de un tiempo prolongado, o al menos durante el ciclo de vida de una flota. Hay muy pocos datos disponibles provenientes de experiencias reales de uso continuado en el tiempo acerca de costos de operación, de mantenimiento, fallas más importantes, tiempo medio entre fallas, necesidades de inversión en herramientas y capacitación especiales, etc. lo que hace que propietarios de flotas importantes sean bastante cautos a la hora de invertir en camiones de recolección de residuos eléctricos, o que su incorporación sea muy gradual.

Impactos ambientales de las baterías

La producción de baterías para vehículos eléctricos tiene impactos negativos sobre el medio ambiente. Están compuestas entre otros materiales por litio, cobalto, níquel y manganeso, cuya extracción suelen generar contaminación y degradación del ambiente, además de consumir energía y recursos naturales escasos y no renovables.

Si bien ha habido avances en el reciclaje de las baterías una vez que cumplieron su vida útil y el aprovechamiento de los materiales ha aumentado, el proceso no está ausente de dificultades, genera emisiones y aún persisten materiales que no se aprovechan.

En el caso particular de Uruguay, aún no existe normativa desarrollada sobre disposición final de baterías.

Necesidades de capacitación y herramientas especiales

La incorporación de vehículos eléctricos para una flota trae aparejado varios desafíos a nivel de la operación y mantenimiento.

Por un lado, se requiere contar con personal capacitado para mantener dichos vehículos y trabajar bajo estrictos protocolos de seguridad para el manejo de alta tensión, presente en los circuitos de baterías. Además, los vehículos eléctricos incorporan una mayor cantidad de componentes electrónicos y de mayor complejidad que los vehículos convencionales.

Esto puede llegar a implicar la necesidad de incorporar nuevo personal si los perfiles actuales, generalmente mecánicos automotrices, no pueden ser reconvertidos a través de capacitación para manejar este tipo de nuevas tecnologías.

A su vez, se requieren herramientas específicas y la generación de nuevos espacios que cumplan con los requerimientos técnicos y de seguridad necesarios para el mantenimiento de este tipo de vehículos.

En ciertos casos, y dado el actual estado de madurez de la tecnología en Uruguay, los representantes no dejan intervenir a terceros en el mantenimiento de este tipo de vehículos, por lo que la cercanía con el representante pasa a ser un punto crítico para quienes quieran incorporar vehículos eléctricos a sus flotas.

Con modelos similares, menor capacidad de carga de los vehículos eléctricos

Con camiones similares o equivalentes, los vehículos eléctricos suelen ser más pesados que su contraparte diésel. Esto se debe principalmente al importante peso de las baterías, que incluso pueden requerir un refuerzo de la estructura para soportarlas, agregando peso adicional.

El peso adicional de las baterías reduce la capacidad de carga útil del camión. Esto hace que, ante camiones con similar carrocería y capacidad nominal de carga, el camión eléctrico tenga una capacidad de carga efectiva de residuos menor. Y en caso de querer igualar la capacidad de carga del camión diésel, se necesite incorporar un vehículo más grande, que lleva baterías más pesadas aún, e incluso pueda llegar a requerir un tercer eje.

Esta diferencia puede no ser relevante en el caso de recolección de residuos reciclables, dónde el límite que efectivamente juega es el volumen de la caja y no el peso de la carga. Tampoco cuando los camiones suelen trabajar con capacidad ociosa. Pero puede tornarse importante cuando los camiones recojan residuos orgánicos y trabajen al límite o cerca de su capacidad de carga. En estos casos, para su sustitución por eléctricos, deberán considerarse camiones más grandes, con una inversión mayor, una eventual necesidad de un tercer eje, con baterías más grandes y de mayor peso, o un rediseño de los recorridos.

En la siguiente sección se presentan algunos ejemplos ilustrativos.

Dificultades de adaptación de equipos en camiones eléctricos.

Los camiones recolectores de residuos y los camiones volcadores, en general no son fabricados originalmente así, sino que se trata de un camión estándar con determinados requerimientos, y luego los fabricantes de equipos (caja compactadora, volcadora, etc.), los diseñan para integrarlos a un determinado modelo de camión. Cuando se define una determinada dupla camión-equipos hay que "hermanarlos". Eso implica trabajo del fabricante del camión con el del equipo para que sea compatible y que los requerimientos de potencia del equipo le pasen desde el camión sin dificultades. Eso se hace con las tomas de fuerza que básicamente son ejes de transmisión que en lugar de ir hacia las ruedas van hacia bombas hidráulicas. Esas bombas hidráulicas requieren determinada potencia y trabajan a determinadas velocidad de giro y hermanar esas necesidades suele ser un trabajo no menor, al menos para el primer vehículo que se haga si no hay experiencia anterior.

El trabajo de compatibilización camión-equipo implica un costo en tiempo y recursos de los fabricantes de equipos, por lo cual estos tienen interés en desarrollar soluciones que integren sus equipos con los camiones más demandados, que no son eléctricos ya que se trata de un mercado incipiente. Difícilmente un proveedor de equipos esté dispuesto a llevar adelante un trabajo de integración con un camión eléctrico en particular, a menos que visualice la existencia de una política que tenga por objetivo la masificación de esta tecnología, y por lo tanto vea esa inversión inicial de compatibilización camión-equipo, en un marco más amplio de negocios a mediano y largo plazo.

Esto fue lo que ocurrió por ejemplo en el caso reseñado de los camiones BYD modelo T8 que fueron equipados con compactadores del proveedor brasileiro Usimeca, el cual generó este desarrollo específico, pero con un horizonte de venta de unas 30 unidades, que fueron las que terminaron comercializándose.

Sin embargo, el modelo de camión BYD T8 fue discontinuado por BYD y sustituido por otro similar, pero Usimeca no ha desarrollado aún un equipo compactador compatible con el nuevo camión eléctrico.

7 Aspectos técnicos del uso de vehículos eléctricos para la recolección y transporte de residuos domiciliarios

Disponibilidad en el mercado internacional de vehículos eléctricos de recolección de residuos y sus principales características, costos y variables de desempeño.

La base de información para esta tarea surge de los contactos y reuniones mantenidos con los representantes de marcas de camiones que pueden tener oferta en los diferentes segmentos analizados. En todos los casos, por tratarse de equipamiento especializado, las representantes debieron contactarse con sus casas matrices y recabar información de modelos y precios. Por eso, las respuestas demoraron más de lo esperado y se obtuvieron menos respuestas de lo deseado.

Los vehículos de recolección de residuos urbanos son vehículos especialmente diseñados para la recolección de desechos y su transporte a centros de reciclaje o sitios de disposición final de residuos.

Usualmente vienen equipados con un sistema de compactación que permite cargar un mayor volumen de residuos por viaje, aunque para determinadas aplicaciones se pueden utilizar vehículos sin compactación.

Existen muchos tipos de vehículos para recolección y transporte de residuos que se utilizan en el país, algunos de ellos:

- De carga trasera manual
- De carga trasera por contenedores
- De carga lateral por contenedores
- Con cajas desmontables tipo roll on - roll off (de recolección y de transporte)
- Camiones de caja fija (abierta o cerrada)
- Camiones con caja con volcadora
- Motocarros

Cuanto más especializados sean los vehículos considerados, menor oferta de marcas y modelos existirá, y lo contrario según los vehículos considerados sean de uso más generalista.

Estos vehículos se pueden clasificar según su capacidad de carga, que puede ser de cientos de kilos a decenas de toneladas o por su capacidad volumétrica en metros cúbicos.

En Uruguay los vehículos más utilizados para la recolección de residuos domiciliarios son los camiones recolectores de carga trasera manual, de carga trasera por contenedores y de carga lateral por contenedores.

Recientemente se han empezado a utilizar y está en proceso de evaluación por parte de la Intendencia de Montevideo un sistema con camiones del tipo roll on - roll off para residuos mezclados. Dichos camiones trabajan como los camiones recolectores de carga lateral convencionales, pero poseen cajas de carga desmontables. Los camiones realizan los circuitos

correspondientes y, una vez llena la caja, el camión se traslada a un lugar donde puede dejar la caja llena y tomar una caja vacía y continuar con la recolección de residuos.

Luego otro tipo de camión se utiliza para trasladar las cajas desmontables llenas hacia el sitio de disposición final de residuos o hacia una planta de transferencia.

Las funcionalidades y variables de desempeño más importantes para los vehículos de recolección de residuos domiciliarios se identificaron a través de entrevistas realizadas a los referentes de flota de recolección de residuos de las intendencias departamentales, empresas proveedoras de servicios, encargados del mantenimiento de flota, proveedores de vehículos/equipos y demás actores relevantes.

A continuación, se listan y definen las variables relevadas más significativas:

Funcionalidad/Variable	Descripción
Tipo de vehículo	Carga trasera, carga lateral, roll on/roll off, camión con caja fija abierta, camión con caja fija cerrada, camión con caja volcadora, motocarros, etc.
Dimensiones	Largo, ancho, alto del vehículo. Las dimensiones son relevantes ya que están relacionadas con los anchos de los caminos, con las curvas, con los sobrepasos y la altura de los puentes por los cuales debe transitar el vehículo. Del mismo modo es especialmente relevante el llamado largo carrozable, a los efectos de la instalación de los correspondientes equipos de recolección de residuos. Usualmente se miden en milímetros (mm).
P.B.T (Peso bruto total)	De acuerdo con los criterios del M.T.O.P se distinguen: P.B.T autorizado por el fabricante: es el peso máximo para el cual el fabricante garantiza el correcto funcionamiento de la unidad. P.B.T máximo según neumáticos: es el peso máximo que surge de la sumatoria de los pesos por eje del vehículo, según sus neumáticos instalados. P.B.T máximo según la normativa: es el peso máximo para el cual la configuración del vehículo está autorizada a circular según el Reglamento de Límite de Pesos. P.B.T máximo autorizado: es el peso máximo para el cual la Dirección Nacional de Transporte habilita a un vehículo a circular por rutas nacionales. Se corresponde con el más restrictivo de los anteriores. Por lo general se mide en kilogramos (kg) y suele establecerse el valor total y por eje del vehículo.
Tara	Peso propio del vehículo, considerando incluido en él, el peso de los fluidos y del combustible contenido en el depósito, herramientas, accesorios, ruedas de auxilio, extintor de incendio y demás equipamientos necesarios para su funcionamiento, sin conductor, ni pasajeros y sin carga.

	Suele medirse en kilogramos (kg).
Carga útil	Surge de restar la tara del PBT máximo, y refiere a los kg o toneladas de residuos que efectivamente puede cargar el vehículo considerando además el conductor y pasajeros.
Capacidad de carga volumétrica	Refiere a la capacidad de carga del vehículo medida en m ³ .
Tipo de motor	Combustión interna, Eléctrico.
Potencia nominal/máxima	Potencia entregada por el motor de combustión interna en HP (según SAE J1349 / ISO o 1585) o potencia total instalada en kW (baterías de tracción y auxiliares) para el caso de vehículos eléctricos. Considerando el P.B.T (peso bruto total) de un vehículo, el M.T.O.P exige una potencia mínima para su motor. El valor nominal refiere a la potencia que puede desarrollar el motor de forma continua y extendida en el tiempo. En contraste, el valor máximo es la potencia más alta que puede desarrollar el motor, aunque no pueda ser mantenida en el tiempo.
Torque nominal/máximo	Refiere al torque disponible por el motor de combustión o el motor eléctrico medidos en N.m. Para el torque, aplican las mismas definiciones de nominal y máximo desarrollados para la potencia.
Norma de emisiones	Aplica para el caso de motores de combustión interna consiste en un programa de medidas reglamentarias por medio del cual se establecen los requisitos y especificaciones técnicas para la homologación de los vehículos de motor a combustión interna en lo referente a las emisiones de gases de combustión (por ejemplo: Euro 4, Euro 5, etc).
Neumáticos	Son relevantes para transmitir la carga total del vehículo al suelo, siendo relevante la cantidad por eje y el tipo, ya que deben estar definidos según el tipo de caminería por la que transite el vehículo.
Tipo y cantidades de motores eléctricos	Puede haber uno solo o varios en un mismo vehículo y de varios tipos.
Cantidad de ejes	Refiere a la cantidad de ejes del vehículo y está relacionado con el P.B.T ya que a mayor valor de este último mayor cantidad de ejes son necesarias para distribuir el peso hacia las ruedas.
Cantidad de ejes de tracción	Refiere a cuántos de los ejes del vehículo son de tracción, lo cual es importante cuando los vehículos deben circular por terrenos difíciles como pueden ser de tierra, barro, etc. Esto pasa, por ejemplo, en algunas localidades del interior o aquellos que deben ingresar a sitios de disposición final. Podemos tener vehículos de 1 eje de tracción, 2 ejes o más (4x2, 6x2, 6x4, etc.)
Transmisión o caja de cambios	Pueden ser manuales con diferentes cantidades de marchas, automáticas o automatizadas, siendo estas dos últimas preferibles para el caso de vehículos de recolección. Por otro lado, para aplicaciones de muchos arranques y paradas deben estar dimensionadas para servicio pesado.
Tomas de fuerza	Transmiten potencia del motor a elementos auxiliares como pueden ser las bombas hidráulicas para mover los equipos compactadores. Los datos relevantes son la cantidad de tomas presentes en el vehículo, el tipo y su potencia.
Tipos de frenos	Neumáticos, eléctricos, de disco, de campana, etc.
Tipo de cabina	Simple, doble cabina, triple cabina.

Baterías principales y auxiliares	Tipo, materiales y tecnología, Peso (kg), Potencia (kW), energía (kWh), capacidad (Ah), cantidad de ciclos, presencia o no de supercondensadores para absorber picos, garantía en kms o años, tipo de conector de carga, etc.
Autonomía	En horas de uso/ kilómetros. Para el caso de un vehículo con motor a combustión interna se refiere a la cantidad de kilómetros/horas con el depósito de combustible lleno. Para el caso de un vehículo eléctrico es la cantidad de kilómetros/horas con una carga completa de baterías, especificando ciclo homologado de referencia y contemplando el uso del equipo con carga y no solamente el vehículo. En todo caso es de suma importancia conocer para que condiciones está calculada la autonomía informada por los fabricantes.
Tiempo de recarga	En el caso de un vehículo con motor a combustión interna es el tiempo necesario para carga completa del depósito de combustible. Para el caso de un vehículo eléctrico es el tiempo necesario para una recarga completa debiendo especificar con qué tipo de cargador y potencia del mismo están calculados.
Tiempos de ciclo	Refiere a los equipos de recolección citando a modo de ejemplo: Apertura trasera para descarga, cierre trasero, retracción de placa de compactación, extensión de placa, retracción de pala, levante de contenedor lateral, vaciado del contenedor, etc. Se mide en segundos.
Nivel de ruido	Tanto interior de cabina como al exterior, medidos en decibeles (dB) en condiciones normalizadas
Rendimientos	En litros/km, litros/horas, kWh/km, kWh/h, etc.
Elementos de seguridad	Cinturones, ABS, EBS, Limitador de velocidad, dispositivo de bloqueo para operación con contenedores, etc.
Elementos de confort	Aire acondicionado de cabina y otros
Homologación local y otros certificados necesarios	Locales ante el M.T.O.P, D.N.T, C.I.R.H.E o internacionales.
Garantías ofrecidas	Del chasis-cabina, de los equipos, de los componentes individuales

Tabla 3. Listado de variables a analizar

En función de dichas variables, para el caso concreto de los vehículos característicos de las flotas utilizadas por las intendencias y empresas proveedoras de servicios del país, se elaboró un documento preliminar de especificaciones a los efectos de relevar la disponibilidad en el mercado de vehículos eléctricos que cumplan determinadas características.

Para ello se procedió a contactar, en una primera instancia, a las principales empresas proveedoras de chasis (Mercedes Benz, Volkswagen, Scania, Volvo, Iveco, Renault, Foton, BYD, etc.) a quienes se les solicitó información de disponibilidad, costos, plazos de entrega, garantías y variables de desempeño.

No se contactó a los proveedores de equipos de recolección (OMB, AMS, Farid, Scorza, McNeilus, Econovo, Themac, etc.) ya que se puso el foco en que se debe contar con el vehículo eléctrico necesario para el montaje de los equipos de recolección.

El mismo equipo para recolección de residuos (como puede ser una caja de compactación trasera) utilizado en un camión convencional a combustión interna se puede montar en un camión eléctrico. En este sentido la consideración más importante que se debe resolver técnicamente es la vinculación del vehículo con el equipo a través de la toma de fuerza.

Esto implica determinado trabajo en conjunto por parte del fabricante del camión con el fabricante del equipo para que los mismos funcionen correctamente en todas las condiciones y que los requerimientos de potencia por parte del equipo le sean transmitidos desde el camión a través de la toma de fuerza sin inconvenientes (tanto en potencia necesaria como en velocidades de giro adecuadas). Por esta razón en las licitaciones públicas de intendencias para la compra de vehículos equipados generalmente se solicita experiencia comprobada del uso del modelo de camión ofertado con el modelo de equipo ofertado. Este requisito se solicita para asegurarse que el conjunto camión-equipos trabaja correctamente y ha sido probado en condiciones normales de operación durante un tiempo razonable.

Se presenta a continuación los contactos realizados con cada una de las marcas y representantes, así como un breve resumen de lo conversado en cada caso, y la información recabada hasta el momento.

Empresa	Marca representada	Personas de contacto
Autolider	Mercedes Benz-Fuso	M.Levy - F.Ausperberg
Mekatronik (Grupo CIR)	Volvo	A.Arbiza - A.Maisonave
Abriley	Maxus	I.Attie
Sadar	BYD	S.Guelfi - I.Ginella
Santa Rosa	Iveco / Renault /JMC /Farison	P.Ramos - G.Cantero
Paleson	Ankai - Windrose	M.Delucchi - O.Sanchez
Foton Daimler Uruguay	Foton (camiones grandes)	J.Liang
Jose Maria Duran	Scania	D.Gambini
Homero de Leon	Foton (camiones chicos)	J.Carnales - S.Grande
Grupo Barriola	Dong Feng	J.Carrasco
Lestido	Volkswagen / MAN	M.Remeseiro
Grupo Fiancar	JAC	F. Mayora - L.Bicchierai

Tabla 4. Representantes y marcas contactadas

Autolider

Entienden que el año 2025 será el año de quiebre en cuanto a la variedad de camiones disponibles. Actualmente cuentan con oferta de vans medianas marca Mercedes Benz modelos Vito y Sprinter. En el caso de los camiones medianos (4 a 7 ton) tienen opciones de la marca Fuso y en el caso de los camiones pesados, camiones eléctricos Mercedes Benz modelo eActros 300 (19 ton) y eActros 400 (27 ton), los cuales podrían utilizarse para montar equipos de recolección trasera en el primer caso y de recolección lateral en el segundo.

Entienden que es posible realizar la tarea de recolección residuos con camiones del tipo eléctrico, pero manifiestan dudas sobre la posibilidad de ingreso al sitio de disposición final debido a que se trata de vehículos con tracción 6x2, no habiendo disponibilidad de modelos con tracción 6x4.

Proveyeron especificaciones técnicas y precios de los modelos disponibles, incluyendo las del camión eActros para ser utilizado como camión recolector con caja compactadora.

Grupo CIR

En enero 2023, Volvo autorizó a Uruguay y Chile para empezar a comercializar la gama completa de camiones eléctricos. Los camiones Volvo comparten todos los componentes con los convencionales, lo cual es una ventaja para las homologaciones y obtención de repuestos.

Han realizado Pruebas simuladas con Cementos Artigas, Grupo RAS, Pepsico, etc.

Manifiestan que, en el caso de los camiones pesados, el peso de las baterías agrega unos 3.000 kg de peso al camión, lo cual repercute en una menor carga útil que puede ser transportada impactando en la viabilidad de los proyectos.

Actualmente un camión VOLVO recolector se encuentra en fase de pruebas en la ciudad de Curitiba en Brasil.



Figura 22. Camión Volvo, Brasil.

Proveyeron especificaciones técnicas y precios de un camión similar al utilizado en Curitiba.

Abriley

Representan la marca MAXUS, del grupo automotriz chino SAIC, uno de los mayores fabricantes de vehículos convencionales y eléctricos del mundo.

Los camiones de la marca MAXUS son los que están siendo utilizados en la experiencia de recolección de residuos que se está desarrollando en Chile por parte de ENEL.



Figura 23. Camión utilizado por Enel en Chile

También cuentan con opciones de vans medianas eléctricas que pueden prestar servicios de apoyo y complementarios de recolección de residuos.

Proporcionaron especificaciones técnicas y precios de diferentes modelos de camiones recolectores traseros.

Sadar

Representantes en Uruguay de BYD. Tienen una gama completa de camiones eléctricos livianos, medianos y pesados. Llevan unos 15 camiones eléctricos vendidos a DHL (4), Interagrovial (3), BIMBO (2), Mirtrans (3), etc., con autonomías de unos 300 kms al día. Acaban de traer en el mes de marzo 1 tractocamión pesado para UPM, modelo Q3MA de 47 ton de peso bruto total homologado.

Están al tanto del proyecto de los camiones recolectores BYD modelo T8 con caja compactadora Usimeca en varias ciudades brasileras. El mismo modelo de camión ha sido discontinuado y Usimeca no estuvo dispuesto a modificar la caja compactadora para adaptarse al nuevo modelo de camión, por lo cual el proyecto en Brasil no ha escalado.



Figura 24. Camión BYD

Entienden que, para poder generar un proyecto exitoso en el país, es necesario acordar con algún proveedor regional de cajas compactadoras.

En el marco del presente trabajo, presentaron un posible desarrollo de un nuevo modelo de camión BYD con caja compactadora Usimeca que podría desarrollarse para ser utilizado en el país. Este es el modelo que se utiliza para los análisis de factibilidad técnica que se presentan más adelante.

Santa Rosa

Son los representantes de Iveco, JMC y Farizon. En el caso de Iveco, manifiestan que no tienen opciones de camiones eléctricos para comercializar en el país, los cuales, si existen en el caso de Farizon y JMC, pero en el segmento de camiones livianos y medianos.

Se envió por parte de Santa Rosa oferta en camiones livianos Farizon y JMC de 6 y 8 ton que pueden utilizarse para aplicaciones de levante de residuos reciclables ya que son similares a los utilizados actualmente por la Intendencia de Canelones.

Paleson

Representan en el país la marca Ankai de ómnibus eléctricos para el transporte de pasajeros, llevando comercializadas más de 30 unidades en varios departamentos del país. También comercializan equipos de remolque en el transporte de madera.

También están comenzando a representar a la marca de camiones eléctricos Windrose (<https://www.windrose.tech>).

No presentaron opciones de vehículos eléctricos disponibles para ser utilizados en recolección de residuos.

Foton Daimler Uruguay

Cuentan con camión del tipo recolector trasero fabricado íntegramente en China, con las siguientes características: Camión mediano con compactador de basura: 4x2 y caja de 15m3 con levante de

contenedores traseros contenedores 1200 litros (puede ser útil para el interior y parte de Montevideo).

Llevaron vendidos unos 30 camiones de este modelo a gasoil y afirman que comparten los mismos repuestos en todo lo que no es eléctrico lo cual facilitaría el servicio posventa.

Como referencia preliminar de precio, nos dicen que el precio de este camión eléctrico sería similar al de un camión IVECO convencional, en torno a los USD 130.000 o USD 140.000.

No presentaron opciones de vehículos eléctricos disponibles para ser utilizados en recolección de residuos.

José María Duran

Son representantes de la marca Scania, una de las más importantes del mundo en camiones pesados. Nos manifestaron que Scania cuentan con camiones recolectores de residuos de carga trasera operando en Suecia.

En el marco del presente trabajo, trajeron al país a un ingeniero especialista de SCANIA, con el cual se generó una reunión conjunta con el equipo consultor y la contraparte del Ministerio de Ambiente.

No presentaron opciones de vehículos eléctricos disponibles para ser utilizados en recolección de residuos.

Homero de León

Son representantes de la marca Foton. Manifiestan tener opciones de camiones eléctricos livianos de 5 y 7 ton.

No presentaron opciones de vehículos disponibles para ser utilizados en recolección de residuos.

Grupo Barriola

Son los representantes de la marca Dongfeng, el mayor fabricante de camiones del mundo.

Manifiestan no tener disponibilidad inmediata de ningún camión eléctrico y que pueden traer contra un pedido específico.

Julio Cesar Lestido

Son los representantes de las marcas Volkswagen y Man. Tienen oferta de varios modelos de camiones eléctricos de la marca Volkswagen que pueden adaptarse al servicio de recolección de residuos.

En particular, han desarrollado el primer modelo de camión eléctrico completamente fabricado en Brasil. Se trata de los camiones e-Delivery 11 (11 ton) y e-Delivery 14 (14 ton) con un precio de referencia de USD 110.000 y USD 140.000 respectivamente (precios internalizados y sin IVA).

Consideran que el modelo de 14 ton sería apto para instalarle una caja compactadora y prestar el servicio de recolección de residuos. La referencia que manejan es una caja compactadora de 13 o 15m³ por un precio de USD 35.000 aunque la capacidad de carga en peso es mucho menor que la de un camión convencional.



Figura 25. Camión eléctrico comercializado por Julio César Lestido

Fiancar

Son los representantes de la marca de camiones JAC, líder en venta de camiones en Uruguay.

Su modelo de camión eléctrico JAC 1063 EV1 es el modelo que está utilizando la Intendencia de Canelones y las empresas concesionarias que prestan servicios de recolección de residuos en el Departamento operando en servicios de levante de residuos reciclables.

Comparación de funcionalidades y variables de desempeño de dichos vehículos en relación con las alternativas existentes a combustión interna en el país y en el mercado internacional.

A los efectos de comparar funcionalidades y variables de desempeño se deberán tener en cuenta las variables de tres sistemas:

- Equipo
- Vehículo
- Conjunto Vehículo-Equipo

En cuanto al sistema “Equipo”, técnicamente no existen grandes cambios a realizar en cuanto a si se instalan en un vehículo de combustión interna o en uno eléctrico, siendo el componente principal por evaluar en dicho caso la toma de fuerza y su integración con el vehículo.

En el caso de un vehículo a combustión interna las tomas de fuerza (de existir) extraen potencia del motor a combustión a través de engranajes situados en la caja de cambios o a veces en el propio motor y lo derivan a bombas hidráulicas que accionan los pistones y movimientos de los equipos.

En el caso de un vehículo eléctrico la toma de fuerza puede o no desaparecer ya que estas funciones se pueden realizar directamente a través de motores eléctricos, tomando potencia de las baterías.

De las entrevistas con los principales fabricantes surgió que muchos están adoptando la configuración de toma de fuerza conectada a una caja de cambios, manteniendo el chasis-cabina la mayoría de las características de un camión convencional en cuanto a la conexión de equipos como puede ser una caja de compactación o una caja volcadora. Aun tomando el caso que las bombas hidráulicas de los equipos se accionen a través de motores eléctricos alimentados por baterías, las variables relevantes a los efectos de evaluar la performance de los equipos (por ejemplo: tiempos de levante de contenedor, tiempo de apertura trasera para descarga, etc.), se mantendrían incambiadas.

Se puede concluir entonces que las variables de desempeño de un equipo conectado a un vehículo con motor a combustión interna y a un vehículo eléctrico son básicamente las mismas.

Donde sí pueden existir grandes diferencias en el desempeño entre una u otra opción es en el propio vehículo y en el conjunto vehículo-equipo como sistema integral.

En ese sentido, del conjunto de variables relevantes identificadas y detalladas en la siguiente sección se pueden extraer las siguientes variables como significativas a nivel comparativo entre una y otra tecnología.

- Autonomía
- Tiempo de recarga
- Carga útil
- Nivel de ruido del conjunto
- Nivel de emisiones

Autonomía

Para un camión típico de recolección con compactador, la capacidad del tanque de combustible suele ser mayor a 300 litros, se puede solicitar “a medida” y es fácilmente modificable para adaptarse a necesidades particulares. Dependiendo del rendimiento, que, según la potencia del vehículo, su uso, el tipo de trayecto y otros factores puede variar entre 2 km/l o 5 km/l. Esa capacidad de tanque puede asegurar entonces una autonomía entre los 600 km y los 1.500 km, muy por encima de las necesidades para cubrir un turno de recolección en cualquier circuito del país.

Para el caso de los vehículos eléctricos, la autonomía relevada por lo general se encuentra en el entorno de los 150 km a 200 km. Esa autonomía está basada en determinadas condiciones o ciclos de conducción del vehículo y generalmente esta informado por el fabricante el ciclo normalizado bajo el cual se calculó la misma.

Para los casos de vehículos livianos por ejemplo se encuentran los ciclos NEDC (New European Driving Cycle), WLTP, ECE15, etc. Estos ciclos homologados de manejo se utilizan para establecer parámetros para que los fabricantes puedan especificar de una misma manera los consumos, emisiones y autonomía de sus vehículos.

Aún no existe un ciclo normalizado para los camiones de recolección de residuos, pero es claro que la autonomía informada para un camión se vería reducida en un camión recolector debido a su régimen de uso y a las necesidades energéticas del equipo de compactación.

Tiempo de recarga

Para el caso de un vehículo con motor a combustión interna el tiempo de recarga está definido en función de cuánto tiempo le lleva al vehículo cargar su tanque de combustible a un nivel máximo de modo de asegurar toda la máxima autonomía.

Habitualmente y de acuerdo con distintas realidades en el país, la carga de combustible se puede realizar al principio del recorrido del vehículo o puede hacerse al final del turno para asegurar que la próxima salida cuente con el combustible necesario. En ese sentido, se puede llegar a tener un tiempo propio del vehículo en la estación para carga y un tiempo de traslado hacia y desde la estación a la base operativa, aunque por lo general en el caso de flotas municipales se utilizan la red de estaciones ANCAP con sistema Sisconve y siempre existe una estación cercana a estos efectos. Por esta razón, el tiempo de recarga en el caso de vehículos convencionales se reduce desde unos pocos minutos a decenas de minutos como máximo.

Distinto es el caso de un vehículo eléctrico, donde los tiempos de recarga para garantizar la totalidad de la autonomía son mucho mayores y depende de la infraestructura de carga que exista en la base de operaciones. Si bien podría existir la posibilidad de realizar recargas en puntos públicos como estaciones de servicio, no resulta práctico del punto de vista operativo contar con esta posibilidad de forma usual, además de que resultaría más caro que recargar en un sitio propio.

Los tiempos de carga de los vehículos eléctricos dependerán de la batería del camión considerado y de la capacidad del cargador. Esta capacidad puede elegirse en un rango bastante amplio, lo cual permite realizar recargas rápidas, como es realizar una recarga completa en menos de 2 horas, o si se cuenta con el tiempo disponible, puede ser más conveniente desde el punto de vista económico y más amigable con la vida útil de la batería, recargar a un ritmo menor. En general las recargas

completas se realizan en las horas de la madrugada para aprovechar los costos menores de la energía. En la sección 9 se describen los cargadores en mayor detalle. Según el escenario de uso, puede ser posible requerir realizar una recarga intermedia durante el día. Esta recarga puede ser aún más rápida si no requiere alcanzar el 100%, solo la carga necesaria para cumplir con el turno del día y retornar a la base para recargar en la noche. Esta diferencia entre las tecnologías requerirá en varios casos, de una adaptación en la planificación de los recorridos y los horarios de recolección, pero no es una adaptación demasiado compleja ya que los camiones de por sí cuentan con plazos de varias horas de inactividad en la mayoría de los casos.

Carga útil

Definida la carga útil como el peso en kg o toneladas de residuos que efectivamente puede cargar el vehículo (considerando además el conductor y pasajeros), para un mismo P.B.T se pueden encontrar diferencias entre un vehículo para recolección con motor a combustión interna y su equivalente eléctrico. Esta diferencia básicamente se encuentra en el peso de las baterías. A medida que aumenta el tamaño de la batería para asegurar determinada potencia o autonomía, se incorpora peso al vehículo y por ende se reduce la capacidad de carga útil.

Por esta razón se hace muy relevante estudiar los requerimientos de carga en peso del vehículo en función de la densidad de los residuos a transportar. El incremento de peso debido a las baterías hace que las aplicaciones donde se manejen densidades bajas, como por ejemplo en residuos reciclables como pueden ser plásticos o cartones, sean por el momento las aplicaciones más favorables para la electrificación.

El peso de las baterías termina siendo un “peso muerto” que el camión debe trasladar así viaje cargado o sin carga. Se define entonces camión equivalente como aquel que mantiene la misma carga útil, penalizando en este caso al camión eléctrico por tener que cargar el peso muerto de las baterías correspondientes.

Como en el caso del camión diésel esto no es necesario, se pueden lograr las mismas cargas útiles con camiones de menor peso bruto vehicular.

Por esta razón, un camión recolector típico de 17 o 18 toneladas de peso bruto total puede cargar entre 6 y 7 ton de residuos. Si se quiere mantener esa capacidad de carga en un camión eléctrico se debe pasar a un camión de mayor porte, por ejemplo, de 21 toneladas de peso bruto total. De este modo, para el comparativo se tomará para el cálculo del consumo eléctrico aquel de un camión de 21 toneladas de P.B.T. y para el consumo diésel un camión de 18 toneladas de P.B.T. En función de las consultas realizadas con informantes calificados de intendencias y empresas privadas, se estimó que en más del 90% de los casos la carga de estos camiones no supera las 7 toneladas, incluso algunos departamentos solo tienen habilitada la carga hasta 6,5 toneladas.

En el caso de los camiones livianos se tomará para el cálculo del consumo eléctrico de un camión de 7,2 toneladas de P.B.T. y para el consumo diésel un camión de 6,5 toneladas de P.B.T.

Nivel de ruido del conjunto

El nivel de ruido de los camiones de recolección de residuos es uno de los factores más importantes desde el punto de vista de los ciudadanos, especialmente para aquellos que viven en zonas en las que la recolección se realiza durante la noche o a primera hora de la mañana.

De acuerdo con la información brindada por fabricantes de camiones eléctricos como Volvo, puede tenerse una reducción de hasta 10dB en el ruido emitido por un camión eléctrico en comparación con su versión convencional.

Sin embargo, en un camión recolector de residuos, el ruido generado por el camión no es solamente el generado por el motor de este, sino también por el funcionamiento de la toma de fuerza, bomba hidráulica y el movimiento del resto de los componentes del camión recolector, como por ejemplo durante el proceso de compactación de residuos.

Los fabricantes de equipos de compactación suelen entregar los datos técnicos acerca de mediciones del nivel de ruido generado por sus equipos en funcionamiento, generalmente en dos condiciones:

- Dentro de cabina con las puertas cerradas (nivel de presión acústica para el lugar de trabajo)
- Nivel de emisión acústica ambiental

A nivel de los equipos montados en camiones convencionales el nivel de ruido es un valor conocido, ha sido ampliamente medido y se presenta en los manuales de los equipos ya que generalmente es limitado por normativa ambiental de cada país.

Por ejemplo, para un camión recolector lateral de fabricación europea, los valores según manual son:

- Nivel de ruido en cabina L_{pA} = 65 dB
- Nivel de emisión acústica ambiental L_{wA} = 102 dB

La información disponible para el caso de equipos montados en camiones eléctricos es muy escasa al momento, se pidió a los fabricantes, pero los mismos no poseen dicha información aún.

En la experiencia mencionada anteriormente, realizada por la Oficina Federal de Energía de Suiza, se realizaron mediciones de ruido comparativas para camiones de recolección convencionales y los prototipos eléctricos en condiciones controladas e iguales.

En dicho estudio se compararon los siguientes escenarios:

- Ruido de fondo antes de que el vehículo esté en el rango de medición
- Desarrollo de ruido cuando está parado (vehículo listo para partir)
- Generación de ruido cuando la compactación de residuos está parada
- Desarrollo de ruido al conducir normalmente de 0 a 30 km/h en 5s
- Desarrollo de ruido al pasar a 30 km/h
- Desarrollo de ruido al pasar a 50 km/h
- Desarrollo de ruido durante la aceleración máxima de 0 a 30 km/h

Como conclusiones del estudio, se obtuvo que desprende que el vehículo convencional con motor diésel tuvo un mayor nivel de ruido en casi todas las mediciones.

Solamente en el escenario de una aceleración máxima de 0 a 30 km/h se puede observar un valor más alto para un vehículo eléctrico. Esto se debe al par significativamente mayor del camión eléctrico y a la consiguiente mayor aceleración debido a que los neumáticos hacen un mayor ruido

al acelerar de esa forma. De todos modos, no es una práctica que se considere normal acelerar de esa forma, por lo que es una situación evitable.

Como conclusión más importante de ese estudio, es la gran diferencia en los niveles de ruido cuando los camiones están parados y al compactar basura, siendo mucho mayores en el caso de los camiones Diesel. Estos valores son especialmente relevantes para los ciudadanos, sobre todo en la recolección nocturna.

Nivel de emisiones

En este punto se ven grandes diferencias ya que los vehículos eléctricos no generan emisiones directas. Sin embargo, indirectamente se generan emisiones a través del uso de la energía eléctrica. Estas emisiones se denominan de Alcance 2 y depende del factor de emisiones de la red. Este factor está compuesto por las fuentes de generación utilizadas para generar la energía eléctrica que utilizó el vehículo. Uruguay contó con una matriz eléctrica 92% renovable en el 2023 [22], lo cual hace que su factor de emisiones sea bastante bajo en comparación con otros países, (60,14 kgCO₂e/MWh en el 2022 [23]) por lo que la reducción de emisiones relacionadas al uso de estos vehículos será muy importante ya que el factor de emisión para el diésel es de 2,67 kgCO₂e/litro [24]. Esto implica una reducción del 94%¹ en las emisiones de CO₂e. Si bien aquí se expresó la reducción de emisiones debido al uso de energía asociadas al cambio tecnológico, para realizar una comparación completa se deberá hallar la huella de carbono asociada a cada tecnología, desde la extracción de materiales para su fabricación hasta su disposición final. Este es un aspecto de debate actual ya que hay incertidumbre sobre las emisiones asociadas a las baterías para los vehículos eléctricos.

En un vehículo con motor a combustión interna, sus emisiones dependerán de las características del vehículo, las normas de emisiones bajo el cual se desarrolló (lo que involucra determinada tecnología), el combustible utilizado junto con las condiciones de operación y de mantenimiento entre otros factores.

Actualmente la normativa europea sobre emisiones elaborada por Comisión Europea es la referencia para los fabricantes más importantes de camiones a nivel mundial. La última norma vigente que aplica a camiones es la norma Euro 6, la cual establece límites estrictos en cuanto a las emisiones de gases y de particulado por parte de los camiones con motor de combustión interna.

De acuerdo con lo relevado en entrevistas con las intendencias, las flotas actuales tienen antigüedades muy variables que van desde menos de un año hasta mayores de 25 años, siendo estas últimas las unidades con mayor grado de emisiones ya que cuentan con tecnología antigua y al momento de desarrollarse contaban con menos exigencias ambientales.

Comparaciones por tipo de camión

- Camión de recolección de levante trasero

¹ De acuerdo con un rendimiento de 1,5km/litro para diésel y 1,74 kWh/km para eléctrico.

Se analizarán a continuación las variables de un camión típico de combustión interna y las variables de los correspondientes equivalentes eléctricos enviados por los representantes.

Variable	Freightliner business class m2 106 38k Equipo McNeilus Metropak 15m3	BYD T018C01 con equipo USIMECA 15m3
Tipo de motor	Diésel	Eléctrico
P.B.T (kg)	17.200	21.000
Tara Camión (kg)	5.146	7.900
Peso equipo (kg)	5.990	6.000
Carga útil (kg)	6.064	7.100
Cantidad de ejes	2	2
Autonomía (km)*	900	200 km
Tiempo de recarga	20 min	No disponible
Nivel de ruido		No disponible
Nivel de emisiones	Euro 3	Cero

Tabla 5. Variables de camiones de recolección de carga trasera

- Camión de recolección de levante lateral

A continuación, se realizará una evaluación similar a la anterior, esta vez con las variables de un camión típico de combustión interna con equipo recolector lateral y las variables de los correspondientes equivalentes eléctricos enviados por los representantes.

Variable	Mercedes Benz Axor 2528 con Equipo OMB CWSB4	Mercedes eActros 400 con Equipo OMB CWSB4
Tipo de motor	Diésel	Eléctrico
P.B.T (kg)	25.000	27.000
Tara Camión (kg)	6.890	10.407
Peso equipo (kg)	9.200	9.200
Carga util (kg)	8.910	7.393
Cantidad de ejes	3	3
Autonomía (km)*	750	300 (solo camión, sin equipo)
Tiempo de recarga	20 min	No disponible
Nivel de ruido	102 dB	No disponible
Nivel de emisiones	Euro 5	Cero

Tabla 6. Variables de camiones de recolección de carga lateral

- Camión con furgón cerrado

Se realizará una evaluación similar, esta vez con las variables de un camión típico de combustión interna con furgón cerrado, semejante al utilizado por la intendencia de Canelones para la recolección de residuos reciclables y las variables de los correspondientes equivalentes eléctricos enviados por los representantes.

Variable	JAC 1048 KT	JAC 1063 EV1
Tipo de motor	Diésel	Eléctrico
P.B.T (kg)	7.490	7.200
Tara Camión (kg)	2.510	3.300
Peso furgón (kg)	700	700
Carga útil (kg)	4.280	3.200
Cantidad de ejes	2	2
Autonomía (km)*	500	200
Tiempo de recarga	20 min	No disponible
Nivel de ruido	No disponible	No disponible
Nivel de emisiones	Euro 3	Cero

Tabla 7. Variables de camión con furgón cerrado

8 Evaluación Económica

En este capítulo se propone evaluar la conveniencia económica de realizar el servicio de recolección de residuos domiciliarios incorporando vehículos eléctricos en lugar de convencionales.

Se trata de una evaluación financiera, cuyo objetivo es determinar la rentabilidad que el proyecto le genera a la Intendencia o empresa titular del proyecto, considerando solamente los ingresos y egresos monetarios, a precios de mercado, que el proyecto le ocasione. Este tipo de evaluación contrasta con una evaluación socioeconómica, cuyo objetivo es cuantificar la variación del bienestar de la sociedad a consecuencia del proyecto, y que implicaría por ejemplo valorar monetariamente los beneficios sociales de la reducción de la contaminación sonora, de la reducción de emisión de gases contaminantes, etc. Este último tipo de evaluación excede los objetivos de este trabajo.

En este caso, el objetivo de la evaluación no consiste en estimar la rentabilidad de brindar el servicio, sino en estimar si hacerlo con una flota que incluya vehículos eléctricos es más o menos conveniente que utilizando vehículos de motorización convencional.

Este tipo de servicios, si se mira desde la óptica de una Intendencia, no genera ingresos monetarios. Desde el punto de vista de un privado, los ingresos que obtiene por brindar el servicio son los mismos independientemente del tipo de flota que utilice. Por ende, la existencia o no de ingresos generados por el servicio, o su cuantía, no afectan el resultado de la comparación y no es necesario incluirlos en la evaluación.

Por la misma razón, no se tomarán en cuenta las inversiones ni los costos comunes a ambas flotas, que permanecerían inalterados fuera cual fuera la flota de vehículos que se emplee, como por ejemplo los costos salariales del personal administrativo, etc.

De esta forma, el análisis se concentrará en la identificación, valoración y comparación de las inversiones y costos diferenciales entre vehículos a combustión interna y eléctricos. Definidas las condiciones del servicio que se decida evaluar, se determinará el Costo Total de Propiedad (CTP o TCO, por sus siglas en inglés: Total Cost of Ownership) para el caso en que se brindara con vehículos eléctricos y para el caso de utilizar vehículos a combustible fósil. De la comparación de los CTP obtenidos surgirá la opción más conveniente desde el punto de vista económico.

Vehículos considerados

En lo que respecta a los vehículos a evaluar para los diferentes escenarios, se consideraron aquellos en los que se encontró disponibilidad de oferta en el mercado y que además técnicamente era factible utilizarlos en las condiciones de trabajo locales.

Los dos tipos de camiones recolectores de residuos sólidos urbanos más utilizados en Uruguay son los camiones recolectores de carga trasera y los camiones de carga lateral.

Para los primeros se gestionaron y pudieron obtenerse ofertas por parte de varios proveedores con representación local y proyectos similares en varios países, algunos relativamente acotados y otros donde se vienen utilizando desde hace varios años.

En el caso de los camiones recolectores de levante lateral, es escasa la oferta más allá de algún prototipo ya que la disposición del equipo de toma y levante ocupa gran parte del lugar donde

habitualmente se montan las baterías del camión. Lo mismo pasa con el espacio ocupado por la tolva y equipo de compactación, que impiden el montaje de baterías en modo mochila. Por otro lado, el sistema de levante de contenedores implica unos requerimientos de potencia instantánea muy elevados, lo que hace que este tipo de camiones requieran baterías de capacidades muy superiores a las que llevaría un camión recolector trasero y posiblemente la necesidad de incorporar supercapacitores para cubrir la alta demanda instantánea, con los consecuentes incrementos en costos y peso que esto implicaría.

Asimismo, tampoco se considera viable realizar la evaluación de camiones de traslado de residuos desde plantas de transferencia a sitio de disposición final ya que son camiones de tipo tractor con semi remolque, con hasta 6 ejes de gran porte, con grandes necesidades energéticas desde el punto de vista de baterías y justificables solamente para el recorrido de grandes distancias. Este tipo de camiones se está proyectando a futuro desde los fabricantes hacia otro tipo de tecnologías limpias como por ejemplo las del tipo celdas de combustible (hidrógeno).

Finalmente, dada la amplia oferta y las exitosas experiencias de implementación en plaza, se entiende conveniente evaluar los camiones eléctricos livianos del tipo furgón cerrado (o abiertos) para el levante de residuos de tipo reciclables. Se tratan de camiones sencillos, con requerimientos de carga bajos dada la densidad de residuos que deben manejar y que cuentan amplia disponibilidad en plaza y sin grandes requerimientos de inversión.

Por lo expuesto anteriormente, se realizará la evaluación económica para los camiones livianos para la recolección de residuos reciclables y para los camiones recolectores traseros sólidos mezclados.

Ofertas recibidas

• Camiones livianos

Marca	Modelo	P.B.T (ton)	Capacidad de carga (kg)	Batería	Autonomía informada	Precio C.I.F (USD)
JAC	1063 EV1 con furgón 17 m ³	7.2	3.200	LFP (Litio-Ferrofosfato) de 97 kWh	200 km	52.900
FARIZON	H9E-8T con furgón 21 m ³	8	4.615	LFP (Litio-Ferrofosfato) de 107 kWh	150 km	62.490
FUSO	CANTER	7.5	4.200	LFP (Litio-Ferrofosfato) de 83 kWh	140 km	100.000

Tabla 8 - Camiones eléctricos livianos cotizados

De las capacidades de batería y autonomías informadas para los diferentes modelos camión liviano con furgón, surgen los siguientes valores de rendimientos:

- JAC1063 EV- 0,49 kWh/km
- FARIZON H9E-8T- 0,71 kWh/km
- FUSO CANTER 7.5- 0,59 kWh/km

De acuerdo con el estudio de las características técnicas, estos camiones serian aptos para el servicio de levante de residuos reciclables, en un régimen similar al que se utiliza actualmente por parte de la Intendencia de Canelones.

• **Camiones recolectores traseros**

Marca	Modelo	P.B.T (ton)	Equipo compactador	Capacidad de carga (kg)	Batería	Autonomía informada	Precio C.I.F (USD)
VOLVO	FM Eléctrico	21	Planalto 15 m ³	>7.500	NCA (Li-ion) de 360 kWh	150 km – 180 km	502.000
BYD	T018C01	21	Usimeca 15 m ³	~ 7.000	LFP (Litio-Ferrofosfato) de 229 kWh	165 km	237.370
MAXUS	FLM518 OZYSNJB EVK	18	Fulongma 13,5 m ³	6.395	LFP (Litio-Ferrofosfato) de 218 kWh	200 km	165.000

Tabla 9 - Camiones eléctricos de carga trasera cotizados

De las capacidades de batería y autonomías informadas para los diferentes modelos de camión recolector trasero, surgen los siguientes valores de rendimiento:

- Volvo FM E 21 con equipo Planalto- 2 a 2,4 kWh/km
- BYD T018C01 21 ton con equipo Usimeca- 1,38 kWh/km
- Maxus 18 ton con equipo Fulongma- 1,09 kWh/km

En ambos casos, como se dijo anteriormente, cabe aclarar que la diferencia en rendimientos puede surgir ya que los fabricantes no informan claramente las condiciones o ciclo de conducción realizado para llegar a los valores de autonomía informados que pueden estar calculados en diferentes condiciones de carga y circulación, por lo que esos valores se deben tomar con cautela a la hora de utilizarlos para calcular costos de operación.

Del mismo modo, para el caso de la capacidad de carga de carga del camión Maxus con equipo Fulongma, la capacidad de carga se entiende muy optimista, de lo contrario el peso del equipo de compactación seria del entorno de los 4.000 kgs, cuando este tipo de equipos se encuentran por lo general para esas dimensiones encima de los 5.500 kgs.

En cuanto al estudio técnico de las ofertas presentadas, se concluye que los camiones Volvo y BYD cumplen con los requerimientos para el servicio de recolección de residuos de levante trasero con o sin contenedores, teniendo especialmente en cuenta que:

- No se recomienda que dichos camiones ingresen a sitio de disposición final debido a las características de montaje de las baterías, las cuales quedarían sujetas a daños por incrustación de objetos o maniobras de rescate que se realizan cuando se entierra un camión en sitio.
- Se entiende que las capacidades de carga que poseen permiten cubrir la mayor parte de los circuitos presentes en la mayor parte de las localidades de Uruguay por lo que es viable sean implantados en prácticamente cualquier departamento realizando mínimos ajustes a los circuitos.

Escenarios

La evaluación económica depende de las condiciones de uso de los vehículos. Las intendencias trabajan en condiciones diferentes y organizan el servicio de forma distinta. Incluso vehículos similares de una misma flota se utilizan de forma diferente. Son muchas las variables relevantes en el análisis y los valores que se asuman para ellas pueden afectar su resultado.

Basados en el relevamiento de información y reuniones mantenidas con la Intendencias (ver Anexo 11 para un resumen de la información obtenida de las intendencias), se definen algunos escenarios a evaluar, que se entiende son representativos de los servicios de recolección de residuos domiciliarios más habituales y las distintas realidades del país.

- **Urbano y suburbano**

Se consideran, tanto para recolectores traseros como para camiones livianos, dos tipos de circuitos. Uno urbano, con un recorrido por turno de 50km y otro suburbano, donde el camión recorre 100 km en un turno.

Se asumirá que cada vehículo trabajará en dos turnos diarios de 7 horas, tomando como referencia los horarios de 7 a 14hs y de 17hs a 24hs. Es decir, un camión con circuito urbano recorrerá 100 km diarios y 200 km si realiza circuitos suburbanos. El horario supuesto de los turnos es arbitrario. Se dejó entre ellos un lapso de tiempo para realizar una carga entre turnos. Sin embargo, como se verá más adelante, no en todos los casos es necesaria. Por ejemplo, en los circuitos urbanos tanto para el camión liviano como para el recolector trasero, no será necesaria una carga intermedia ya que es suficiente con una carga nocturna completa, por lo que los dos turnos podrían darse uno a continuación del otro. En las zonas suburbanas, el espacio necesario dependerá de la potencia de los cargadores que se utilicen. Con los supuestos considerados, sería suficiente un lapso entre turnos de dos horas y media. De ser necesario, podría reducirse aún más aumentando la potencia contratada y adquiriendo cargadores más potentes.

Que el circuito sea urbano o suburbano impacta en los rendimientos de los vehículos, por el diferente consumo de gasoil en un caso y por la distinta incidencia de la regeneración de energía por frenado en el caso de los eléctricos. En el caso de los eléctricos, los distintos recorridos inciden en el uso de la batería, en las necesidades de carga en diferentes horarios con costos distintos del kWh, entre otras cosas. Comparar dos escenarios con distintas distancias permitirá valorar el impacto que, vía reducción de los costos por consumo energético de los camiones eléctricos, estas variables tienen sobre la evaluación.

Supuestos generales

Horizonte temporal: La evaluación se realiza para un período de 8 años, período que coincide con una estimación conservadora de la vida útil de la batería de un camión eléctrico.

Tasa de descuento: se optó por utilizar un 8% anual, un valor que generalmente se suele tomar como referencia para la comparación intertemporal del dinero o medida del costo de oportunidad del dinero invertido.

Regeneración de frenado: De acuerdo con los valores de referencia citados por fabricantes y en bibliografía de referencia, se tomarán valores de 25% de recuperación de energía de frenado para los camiones que trabajen en circuitos urbanos y de 12% para aquellos que trabajen en los circuitos suburbanos.

Rendimientos utilizados: A los efectos de este estudio, se utilizaron rendimientos para los camiones convencionales los cuales que son conocidos, ya sea por experiencia o por datos otorgados por los fabricantes. Ver anexo 12 para una descripción de las fuentes de información consideradas.

Cabe aclarar que los valores de rendimiento son promedios que dependen de muchos factores, como pueden ser: condiciones de conducción, condiciones de carga, topografía del terreno, tipo de circuito y cantidad de paradas, condiciones de mantenimiento del camión, consumo de los accesorios (como por ejemplo aire acondicionado), tecnología del motor, etc.

Los valores de rendimiento para los camiones eléctricos, tratándose de un caso con menores fuentes de información y experiencia, se extrajeron de varias fuentes. Por un lado, para los camiones del tipo liviano se utilizaron datos de fabricantes y se contrastaron con datos obtenidos de la Intendencia de Canelones y de una empresa privada.

Para el caso de camiones recolectores eléctricos, se utilizó un modelo de cálculo de elaboración propia y se contrastaron con los datos otorgados por fabricantes y bibliografía de experiencias en el exterior. Los resultados obtenidos por el modelo implican un mayor consumo de energía (y por tanto, menor autonomía) que los resultados recabados de la experiencia llevada adelante en Brasil con camiones similares, lo cual coloca al análisis realizado del lado de la mayor seguridad en sus conclusiones.

Cabe aclarar que, en el caso de los camiones eléctricos, el peso de las baterías termina siendo un “peso muerto” que el camión debe trasladar así viaje cargado o sin carga. Se define entonces camión equivalente como aquel que mantiene la misma carga útil, penalizando en este caso al camión eléctrico por tener que cargar el peso muerto de las baterías correspondientes.

Como en el caso del camión diésel esto no es necesario, se pueden lograr las mismas cargas útiles con camiones de menor peso bruto vehicular.

Entonces, se resumen en la siguiente tabla los valores promedio de rendimientos a ser utilizados para los cálculos:

Vehículo	Circuito	Rendimiento Diésel (km/l)	Rendimiento Diésel (km/l) Camión equivalente	Regen.	Rendimiento Eléctrico (kWh/km)
Camión liviano con furgón 7,2 ton	Urbano	4,7 (@ 6,5 ton)	4,5 (@ 7,2 ton)	25%	0,58
	Suburbano	5,3 (@ 6,5 ton)	5,1 (@ 7,2 ton)	12%	0,57
Camión recolector trasero 21 ton	Urbano	1,8 (@ 18 ton)	1,5 (@ 21 ton)	25%	1,73
	Suburbano	2,1 (@ 18 ton)	1,7 (@ 21 ton)	12%	1,70

Tabla 10 - Rendimientos considerados en el análisis

Costos de mantenimiento: en el caso de los camiones convencionales a combustión interna, se debe diferenciar por un lado los costos de mantenimiento preventivo y por otro los costos de mantenimiento correctivo.

Se pondrá foco únicamente en el conjunto chasis-cabina en versión convencional y en versión eléctrica. Se puede asumir que el costo de mantenimiento asociado a los equipos de recolección de residuos o las cajas furgón se mantienen incambiados entre una y otra opción ya que no existen diferencias entre los equipos que se montan en los camiones convencionales con los que se montan en camiones eléctricos.

Los valores de mantenimiento preventivo se consultaron a los fabricantes de chasis-cabina en base a las rutinas establecidas por los mismos, obteniendo un costo de mantenimiento preventivo de 0,056 USD/km para los camiones livianos con furgón, y de 0,13 USD/km para el caso de los chasis-cabina de los camiones del tipo recolector trasero.

Por otro lado, se puede afirmar que bajo una adecuada política de mantenimiento basada en las mejores prácticas que permitan asegurar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos a lo largo del tiempo, la relación de costos optima tratándose de equipos nuevos sería la de un 70% de los costos asociados a mantenimiento preventivo y un 30% de los costos a mantenimiento correctivo.

Bajo esos supuestos, se tomarán entonces los siguientes valores de mantenimiento como referencia para los cálculos, asumiendo un mismo valor tanto para el caso de circuitos urbanos como suburbanos:

Camión liviano furgón diésel: 0,08 USD/km

Camión recolector trasero diésel: USD 0,185/km

Para obtener los valores para el mantenimiento de los camiones en sus variantes eléctricas se utilizaron datos de relevamientos realizados, experiencia internacional e informantes calificados y se estimó que el costo de mantenimiento para los camiones eléctricos asciende al 50% del costo que afronta su vehículo convencional equivalente, lo cual es consistente con el ahorro en mantenimiento relevado en otros vehículos pesados (ómnibus) ya en funcionamiento desde hace años en el país.

Esta diferencia se debe en gran parte a que en un camión con motor eléctrico no se requieren cambios de aceite de motor ni filtros (de aceite, de combustible, de aire). Mientras que en un motor

convencional a combustión interna podemos tener más de 2.000 piezas el motor eléctrico es más sencillo, con apenas alrededor de unos 20 componentes. Por otro lado, en cuanto al sistema de frenos, el mismo sufre menor desgaste ya que la presencia del freno regenerativo hace que el sistema de frenos se utilice un 80% menos que en un camión convencional, con el consecuente ahorro en desgaste de discos, campanas, patines, etc.

Precios de vehículos y equipos: Dada la posibilidad de las Intendencias de exonerar todos las tasas y tributos a la importación de vehículos y equipos, se considerarán los precios CIF, a los que se le agregarán un 8% para gastos asociados a despacho y demás trámites de importación. Para las inversiones y costos locales se considerarán los precios de mercado IVA incluido.

Valor Residual: Para determinar el valor residual de los camiones convencionales, se considerará una vida útil de 15 años, con depreciación lineal.

En el caso de los vehículos eléctricos, la vida útil del camión y de la batería son significativamente diferentes, por lo que el valor residual de cada uno de estos dos componentes se estimará por separado y se sumarán para obtener el valor residual total.

El costo de la batería se calculará, según su tamaño, a partir de un precio de 160 USD/kWh, obteniéndose por diferencia el costo del camión sin batería. Para la batería, se asume una vida útil de 8 años, período que suelen dar como garantía los fabricantes, como es el caso de los buses que se han adquirido para el transporte público metropolitano y el que ofrecen los camiones livianos JAC utilizados en el análisis. Luego de dicho plazo, se asume tendrá un valor residual luego del mismo equivalente al 10% de su costo de adquisición. Para el camión sin batería, al igual que para los camiones convencionales, se supondrá una vida útil de 15 años con depreciación lineal.

Se asumirá que ni los cargadores ni las nuevas conexiones eléctricas tienen valor residual.

Cargadores: se obtuvieron presupuestos de varias empresas, algunas chinas otras europeas, y de diversas capacidades. Para el trabajo se tomó como referencia un promedio de las cotizaciones obtenidas, según las capacidades que ser requieran en cada escenario.

Rendimiento de los cargadores: Aunque hay cargadores que llegan a tener 95% de eficiencia (por ejemplo de la línea ABB Terra DC²), se utilizara un valor más conservador de 92%.

Por ende, cada 92kWh de carga que deban reponerse en las baterías, implicará 100kWh que se consumirán de la red de UTE.

Conexión de UTE: Para los escenarios manejados, no se requeriría construir una subestación propia, evitando la inversión necesaria y los costos de mantenimiento que esta conllevaría. Las potencias necesarias podrían ser obtenidas conectándose a la tarifa general estacional en el caso de un camión liviano, o la MC1 en el caso de varios camiones livianos, uno o unos pocos camiones recolectores traseros, según la estimación de la demanda mensual de energía.

Las inversiones necesarias fueron estimadas asumiendo que en la zona donde se emplaza la base de los camiones UTE tiene capacidad instalada y disponible. Se supuso en todos los casos realizar

² Ver hojas de datos de cargadores anexadas a este informe.

una nueva conexión con UTE, específica para este servicio, considerando tasa de conexión de UTE, costo del instalador y cables de baja tensión subterráneos o aéreos.

Gasol y tipo de cambio: Se tomó como referencia el precio del litro de Gasol a \$ 54,89 vigente en abril de 2024, y un tipo de cambio de \$ 39 por dólar

Seguros: El costo del seguro depende de varias variables, marca, modelo y compañía aseguradora entre varias otras. Las intendencias aseguran por flota, consiguiendo precios más bajos que los de mercado, y la cotización depende entre otras cosas del tamaño de su flota. Se estimó el valor de los seguros tomando como referencia los costos que pagan hoy algunas intendencias, los precios de los vehículos asegurados y los considerados para la evaluación. No se pidieron cotizaciones específicas para todos los modelos considerados, porque además de no estar disponibles en el mercado, la incidencia de los seguros en el resultado de la evaluación es marginal.

Servicio de recolección de residuos reciclables en camiones con furgón cerrados

Este servicio ya se viene realizando con camiones livianos eléctricos en Canelones, tanto con camiones de la Intendencia como por privados, y en Rocha por una empresa privada. Varios insumos para el modelo fueron tomados en base a lo observado en estas experiencias.

El modelo de referencia para camión convencional será el JAC 1048 KT, y para el eléctrico el JAC 1063 EV1, cuyas especificaciones técnicas se detallaron en la sección 7.

Como ya se adelantó, se plantearán dos escenarios diferentes. Uno de ellos como representativo de la recolección en zona urbana, con menores recorridos, menores distancia entre paradas y un rendimiento en el consumo de energía un poco menor. El otro representativo del servicio en zona suburbana.

Circuitos urbanos

El camión realiza dos turnos diarios de 50km de recorrido cada uno.

Dado el consumo de energía se trabaja con la Tarifa General Hora-Estacional

El rendimiento de un camión diésel del tipo considerado, en zona urbana, es de 4,7 km/litro. En tanto el del vehículo eléctrico, incluyendo el regenerado, tiene un consumo de 0,58 kWh/km.

El costo de mantenimiento para un camión convencional de este tipo se estimó en 0,08 USD/km. Como ya se adelantó, el camión eléctrico equivalente tendrá un costo de mantenimiento equivalente al 50%.

Al recorrer 50km, con un rendimiento de 0,58 kWh/km, en cada turno consume un 30% de la batería (29kWh), por lo que no se necesitarán cargas intermedias dado que la autonomía es bastante mayor al recorrido de dos turnos. La batería se recargará en la noche, en horario valle, minimizando el costo del kWh.

Se consideran cargadores de 20 a 25kW, realizando la recarga completa en un tiempo de entre 2,5 y 3 horas. Se asume una potencia contratada para el suministro de 25kW.

El Flujo de Fondos y el CTP para las opciones eléctrica y convencional son las siguientes:

- Eléctrico

RUBRO	AÑOS								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Costo de vehículo	57.132								
Infraestructura	2.370								
Cargador	9.875								
Costo mantenimiento		1.248	1.248	1.248	1.248	1.248	1.248	1.248	1.248
Costo energético		2.135	2.135	2.135	2.135	2.135	2.135	2.135	2.135
Seguros y otros		600	600	600	600	600	600	600	600
Valor Residual									- 20.984
FF	69.377	3.983	3.983	3.983	3.983	3.983	3.983	3.983	- 17.002

Tabla 11 - Flujo de fondos caso eléctrico liviano urbano. Valores en USD.

CTP eléctrico liviano urbano: USD 80.926

- Diésel

RUBRO	AÑOS								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Costo de vehículo	35.402								
Costo mantenimiento		2.496	2.496	2.496	2.496	2.496	2.496	2.496	2.496
Costo energético		9.343	9.343	9.343	9.343	9.343	9.343	9.343	9.343
Seguros y otros		500	500	500	500	500	500	500	500
Valor Residual									- 16.521
FF	35.402	12.339	12.339	12.339	12.339	12.339	12.339	12.339	- 4.182

Tabla 12 - Flujo de fondos caso diésel liviano urbano. Valores en USD.

CTP diésel liviano urbano: USD 97.384

El CTP del vehículo eléctrico asciende a USD 80.926 frente a USD 97.384 para el vehículo convencional, resultando conveniente desde el punto de vista económico.

	Energía anual (kWh)	Emisiones anuales (ton CO2e)
Furgón urbano diésel	65.985	17,7
Furgón urbano eléctrico	19.670	1,2
Diferencia	46.315	16,5
Diferencia en proporción	70%	93%

Tabla 13 - Resultados anuales liviano urbano

El cambio a la opción eléctrica reduce la intensidad energética en un 70% y las emisiones bajan un 93%.

Circuitos suburbanos

Como representativo de un circuito suburbano, con mayores recorridos y menos paradas, se supondrán dos turnos diarios de 100 kilómetros cada uno.

El rendimiento de un camión liviano diésel con furgón cerrado, en zona suburbana, es algo superior al de zona urbana, estimándose un rendimiento de 5,3 km/litro. Por el contrario, el vehículo eléctrico ahora con menor recuperación de carga por freno con regeneración tendrá un consumo estimado de 0,57 kWh/km.

El costo de mantenimiento estimado por kilómetro no varía respecto a los circuitos urbanos.

Al recorrer 100km, con un rendimiento de 0,57 kWh/km, en cada turno consume un 58,9% de la batería (57kWh). Se establece que los camiones, luego del primer turno, tendrá una carga hasta el 80% de la capacidad de la batería en horario llano. Regresarán en la noche luego del segundo turno con una carga restante del 21,1% de la batería, y se les dará carga completa en valle.

Al igual que en el escenario anterior, se asumieron cargadores de 20 a 25kW, realizando la recarga de la tarde en aproximadamente 2 horas y la recarga completa nocturna, dependiendo de la capacidad del cargador, en un tiempo de casi 5 horas. Se contratará una potencia de 25kW.

El Flujo de Fondos y el CTP para las opciones eléctrica y convencional son las siguientes:

- Eléctrico

RUBRO	AÑOS								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Costo de vehículo	57.132								
Infraestructura	2.370								
Cargador	9.875								
Costo mantenimiento		2.496	2.496	2.496	2.496	2.496	2.496	2.496	2.496
Costo energético		3.803	3.803	3.803	3.803	3.803	3.803	3.803	3.803
Seguros y otros		600	600	600	600	600	600	600	600
Valor Residual									- 20.984
FF	69.377	6.899	6.899	6.899	6.899	6.899	6.899	6.899	- 14.086

Tabla 14 - Flujo de fondos caso eléctrico liviano suburbano. Valores en USD.

CTP eléctrico liviano suburbano: USD 97.683

- Diésel

RUBRO	AÑOS								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Costo de vehículo	35.402								
Costo mantenimiento		4.992	4.992	4.992	4.992	4.992	4.992	4.992	4.992
Costo energético		16.571	16.571	16.571	16.571	16.571	16.571	16.571	16.571
Seguros y otros		500	500	500	500	500	500	500	500
Valor Residual									- 16.521
FF	35.402	22.063	22.063	22.063	22.063	22.063	22.063	22.063	5.542

Tabla 15 - Flujo de fondos caso diésel liviano suburbano

CTP diésel liviano suburbano: USD 153.262

Como era de esperar, al mantener el monto de las inversiones y aumentar el uso de los vehículos, y por ende el consumo de energía, la opción eléctrica se hace mucho más conveniente. En este escenario, el CTP del camión diésel es 63,7% más alto que el CTP del camión eléctrico.

	Energía anual (kWh)	Emisiones anuales (ton CO ₂ e)
Furgón urbano diésel	117.029	31,4
Furgón urbano eléctrico	38.661	2,3
Diferencia	78.369	29,1
Diferencia en proporción	67%	93%

Tabla 16 - Resultados anuales liviano suburbano

El cambio a la opción eléctrica reduce la intensidad energética en un 67% y las emisiones bajan un 93%.

Servicio de recolección de residuos mezclados en camiones de recolección trasera

El modelo de referencia para camión convencional será el Freightliner Business Class M2 106 38k con equipo McNeilus Metropak de 15m³, ya descripto anteriormente. Para el camión eléctrico, se considera como referencia el BYD T018C01 con compactadora USIMECA de 15m³.

Circuitos urbanos

El camión realiza dos turnos diarios de 50km de recorrido cada uno.

Dado el mayor consumo de energía de estos camiones, la tarifa conveniente que permite el pliego tarifario de UTE es la MC1.

El rendimiento de un camión diésel del tipo considerado, en zona urbana, fue estimado en 1,8km/litro. Para el vehículo eléctrico, con regeneración por frenado incluido, el consumo energético se estimó en 1,73 kWh/km.

Para el camión convencional tomaremos un costo de mantenimiento preventivo y correctivo, sin incluir el relacionado a equipos de recolección o caja, de 0,185 USD/km. El camión eléctrico tendrá un costo de mantenimiento equivalente al 50%.

Dada la batería de 229 kWh, y el rendimiento de 1,73 kWh/km, consumiendo hasta el 80% de la carga de la batería el camión eléctrico puede recorrer 106 km. Dado que entre los dos turnos recorre 100 km no será necesaria una carga intermedia, pudiendo realizarse una carga nocturna completa. Este supuesto que se utilizará para los cálculos es flexible y si por seguridad se optara por hacer alguna recarga intermedia su impacto sobre los resultados sería muy marginal.

Se asumirán cargadores de entre 60 y 80 kW, realizando la carga completa en aproximadamente 4 horas (para 60kW). Se asumirá una potencia contratada de 80 kW en Valle y otros 40 kW en Punta-Llano por cualquier eventualidad.

El Flujo de Fondos y el CTP para las opciones eléctrica y convencional son las siguientes:

- Eléctrico

RUBRO	AÑOS								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Costo de vehículo	252.971								
Infraestructura	10.372								
Cargador	19.750								
Costo mantenimiento		2.886	2.886	2.886	2.886	2.886	2.886	2.886	2.886
Costo energético		8.635	8.635	8.635	8.635	8.635	8.635	8.635	8.635
Seguros y otros		2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Valor Residual									-104.618
FF	283.093	13.521	13.521	13.521	13.521	13.521	13.521	13.521	-91.097

Tabla 17 - Flujo de fondos caso eléctrico recolector trasero urbano

CTP eléctrico recolector trasero urbano: USD 304.273

- Diésel

RUBRO	AÑOS								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Costo de vehículo	139.320								
Costo mantenimiento		5.772	5.772	5.772	5.772	5.772	5.772	5.772	5.772
Costo energético		24.396	24.396	24.396	24.396	24.396	24.396	24.396	24.396
Seguros y otros		750	750	750	750	750	750	750	750
Valor Residual									-65.016
FF	139.320	30.918	30.918	30.918	30.918	30.918	30.918	30.918	-34.098

Tabla 18 - Flujo de fondos caso diésel recolector trasero urbano

CTP diésel recolector trasero urbano: USD 281.866

El CTP del vehículo convencional asciende a USD 281.866 frente a USD 304.273 para el vehículo eléctrico, un 7,9% más bajo. Considerando que se trabaja con flujos futuros en condición de incertidumbre, si bien la conversión a flota eléctrica no sería económicamente conveniente, la diferencia es muy baja como para ser concluyentes. Vale la pena recordar que el método utilizado no incorpora en la evaluación económica los beneficios asociados a la reducción de la contaminación por emisiones, a la contaminación sonora y la mejora en el servicio, entre otros varios beneficios de una flota eléctrica.

	Energía anual (kWh)	Emisiones anuales (ton CO2e)
Carga trasera urbano diésel	172.293	46,3
Carga trasera urbano eléctrico	58.670	3,5
Diferencia	113.624	42,8
Diferencia en proporción	66%	92%

Tabla 19 - Resultados anuales carga trasera urbano

El cambio a la opción eléctrica reduce la intensidad energética en un 66% y las emisiones bajan un 92%.

Circuitos suburbanos

Como se estableció en los escenarios supuestos, en el caso de los circuitos suburbanos se asumen dos turnos de 100 km cada uno.

El rendimiento de los camiones de recolección trasera diésel en zonas suburbana aumentó con relación al de la zona urbana a 2,1 km/litro. En tanto para el eléctrico, con menor regeneración por frenado que en la zona urbana, su rendimiento se pasó a 1,70 kWh/km.

Dado que el tamaño de la batería de vehículo de referencia es 229 kWh, el rendimiento señalado, y considerando un nivel de carga mínima al término del circuito del 20%, la autonomía del camión eléctrico sería de 108 km, permitiendo cubrir la distancia prevista, pero dejando un margen acotado ante alguna eventualidad.

La distancia planteada no está asociada a ningún caso real que se haya tomado de referencia, sino que pretende ser representativa de situaciones diversas. Si para un caso concreto se fijara un circuito con mayores distancias, o se quisiera disponer de una holgura mayor, existe la posibilidad de incorporar al camión BYD T018C01 una batería más grande a la considerada originalmente, elevando su capacidad a 348 kWh e incrementando su autonomía a 164 km. Esta opción aumentaría el costo del vehículo en aproximadamente USD 20.000 y, dado el peso de la nueva batería, reduciría su capacidad de carga útil en aproximadamente 800 kg.

Continuando ahora con el recorrido supuesto, debería darse una carga completa, desde el 25,8% al 100% de la capacidad de la batería, luego de cada turno.

Como en escenario urbano, se trabajará con la tarifa MC1. Se recomienda utilizar cargadores preferiblemente de 80 kW y contratar potencia tanto en Valle como en Punta-Llano de 80 kW, que

permitirían realizar la carga en menos de 4 horas. El tiempo de carga podría reducirse, utilizando cargadores de mayor potencia, lo que implicaría también contratar mayor potencia a UTE.

El Flujo de Fondos y el CTP para las opciones eléctrica y convencional son las siguientes:

- Eléctrico

RUBRO	AÑOS								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Costo de vehículo	252.971								
Infraestructura	10.372								
Cargador	19.750								
Costo mantenimiento		5.772	5.772	5.772	5.772	5.772	5.772	5.772	5.772
Costo energético		21.054	21.054	21.054	21.054	21.054	21.054	21.054	21.054
Seguros y otros		2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Valor Residual									- 104.618
FF	283.093	28.826	28.826	28.826	28.826	28.826	28.826	28.826	- 75.793

Tabla 20 - Flujo de fondos caso eléctrico recolector trasero suburbano

CTP eléctrico recolector trasero suburbano: USD 392.221

- Diésel

RUBRO	AÑOS								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Costo de vehículo	139.320								
Costo mantenimiento		11.544	11.544	11.544	11.544	11.544	11.544	11.544	11.544
Costo energético		41.821	41.821	41.821	41.821	41.821	41.821	41.821	41.821
Seguros y otros		750	750	750	750	750	750	750	750
Valor Residual									- 65.016
FF	139.320	54.115	54.115	54.115	54.115	54.115	54.115	54.115	- 10.901

Tabla 21 - Flujo de fondos caso diésel recolector trasero suburbano

CTP diésel recolector trasero suburbano: USD 415.173

El CTP del vehículo convencional asciende a USD 392.221, un 5,5% más bajo del CTP del vehículo eléctrico. Si bien resulta conveniente la opción eléctrica, una variación menor en las estimaciones, podría modificar la conclusión. Al igual que para el circuito urbano, pero en sentido inverso, puede afirmarse que no hay diferencias económicas significativas entre las dos opciones consideradas y no se puede ser concluyente sobre la conveniencia de una sobre otra.

	Energía anual (kWh)	Emisiones anuales (ton CO2e)
Carga trasera urbano diésel	295.360	79,3
Carga trasera urbano eléctrico	115.304	6,9
Diferencia	180.056	72,4
Diferencia en proporción	61%	91%

Tabla 22 - Resultados anuales carga trasera urbano

El cambio a la opción eléctrica reduce la intensidad energética en un 61% y las emisiones bajan un 91%.

Escala

La mayoría de los costos e inversiones son proporcionales. Si todos lo fueran, evaluar la incorporación de n camiones, daría un CTP n veces mayor en las dos opciones, la relación entre ambos se mantendría constante y por ende lo que conviene para un vehículo, convendría también para n.

En el caso de los vehículos convencionales todos los costos e inversiones son proporcionales. Para los vehículos eléctricos la mayoría lo son, pero hay unos pocos rubros, asociados a la carga de energía, que no son proporcionales, sino que al multiplicar la cantidad de camiones estos crecen relativamente menos. Se trata de las inversiones en infraestructuras de carga, cargadores y potencia de carga contratada. Por ejemplo, si se duplica la cantidad de vehículos y por ello se necesitará cargadores con el doble de capacidad, el costo de los cargadores no se duplicaría, sino que aumentaría proporcionalmente menos. Además, según la capacidad de los cargadores, estos podrían dar servicio a más de un camión por día mediante una gestión adecuada de la carga. Esta optimización es posible y reduciría significativamente el costo de la infraestructura de carga por vehículo. Pero en todos los casos analizados estos costos tienen una incidencia muy baja, del orden 20% del CTP. En síntesis, al replicar la evaluación para una cantidad mayor de vehículos, es de esperar que la conclusión se mantenga. Si para un vehículo, en función del CTP, era conveniente la opción eléctrica, con n vehículos lo sería aún más. Si en cambio, para vehículo y un escenario dado era conveniente la opción convencional, debería ser muy baja la diferencia entre los CTP de las dos opciones para que considerando una mayor cantidad de camiones la conclusión cambiara y pasara a ser más conveniente la opción eléctrica.

Incertidumbre y sensibilidad

Toda evaluación de proyectos se apoya en predicciones de inversiones, ingresos y/o costos futuros, caracterizados por su falta de certeza. La incertidumbre aumenta con el tiempo, es decir, cuanto más cercanos en el tiempo se den los egresos o ingresos, mayor certidumbre habrá sobre ellos; cuanto más lejanos en el tiempo, mayor será la incertidumbre.

Si con el paso del tiempo se observaran valores que difirieran significativamente de las estimaciones utilizadas en la evaluación, podría ocurrir que las conclusiones de la evaluación terminarían siendo equivocadas.

Para tratar la incertidumbre y evaluar la confiabilidad del resultado de la evaluación, se suelen realizar análisis de sensibilidad. Es decir, identificar las variables críticas del proyecto, plantearse cambios razonables en ellas y observar cómo afectarían las conclusiones de la evaluación.

Certeza y sensibilidad para los camiones livianos

En el caso de los vehículos eléctricos, la variable que más incidencia tiene sobre el CTP y por ende sobre el resultado del análisis es la inversión en el vehículo, representando el 70,6% o 58,5% del CTP, según se tome como referencia el escenario de camión liviano con operación urbana o suburbana. El valor de esta variable tiene un muy alto grado de certeza, no solo por la estabilidad de su precio de mercado en el corto plazo, sino porque se suele contar con un presupuesto del proveedor que garantiza será mantenido por un determinado plazo.

El costo del vehículo, junto con las inversiones en infraestructura de carga, se realizan todas al inicio del proyecto. Cuanto más cercanas en el tiempo son las inversiones o los costos, más certera es su estimación, menor incertidumbre tienen. En los mencionados escenarios, las inversiones que dan inicio al proyecto representan entre el 86 % y el 71% del CTP, en tanto las variables futuras representan el 14% o 29%. Una buena estimación de las inversiones iniciales nos da un alto grado de certeza sobre el resultado. El CTP de los vehículos eléctricos tiene muy bajo grado de incertidumbre.

Considerando como ejemplo el circuito suburbano, y suponiendo que los costos de operación y mantenimiento terminaran siendo radicalmente distintos a los utilizados en la evaluación, asumiendo que tanto el costo de la energía ya sea por aumento en la tarifa de UTE y/o reducción del rendimiento del vehículo, como el costo de mantenimiento del vehículo eléctrico se duplicaran, o sea fueran el doble de las estimaciones utilizadas en la evaluación realizada anteriormente. Esto llevaría el CTP del camión eléctrico de USD 97.683 a USD 133.878.

Un cambio tan grande en los costos de operación y mantenimiento generarían un aumento del CTP de apenas 37%. Aún con esos cambios tan grandes y muy poco probables, el CTP del camión eléctrico sería sensiblemente inferior que el CTP del camión convencional, que ascendía a USD 153.262.

No ocurre lo mismo con la evaluación de los vehículos a combustión, donde el costo del camión es mucho menos relevante sobre el resultado del análisis. Por ejemplo, en el escenario del camión liviano con circuito suburbano, la inversión en el vehículo representó apenas el 23,1% del CTP. La variable más crítica en la evaluación de vehículos convencionales, la que mayor impacto genera sobre el CTP, es el costo energético, que representa pesa el 62,1% de este. El costo energético depende del rendimiento del vehículo y del costo del Gasoil. Si bien el rendimiento es variable y depende del uso que se le dé al vehículo, del estado de conservación, las características de conducción y otros factores, existen amplios antecedentes y no es esperable observar rendimientos muy diferentes a los supuestos. La incertidumbre del CTP de un vehículo convencional depende principalmente de la incertidumbre del precio del Gasoil.

Esto implica que, ante cambios futuros en el precio de este combustible, variable sobre la cual no se tiene incidencia y cuyo valor futuro es difícil de predecir, el CTP variaría significativamente. Por ejemplo, si el gasoil aumentara un 20% desde el año 1 en adelante, el CTP aumentaría un 12,4%.

Sin embargo, asumiendo el resto de las variables constantes, para que la opción eléctrica dejara de ser conveniente, el costo del Gasoil debería reducirse a menos de la mitad, aproximadamente un 58%, algo muy poco probable.

En síntesis, aún ante la posibilidad errores de estimación o cambios muy significativos en las variables futuras, igual resulta altamente concluyente la conveniencia económica de los camiones livianos eléctricos sobre los convencionales.

Certeza y sensibilidad para los camiones recolectores traseros

En el caso de los vehículos eléctricos, se refuerza lo observado anteriormente. El peso del costo del camión recolector trasero eléctrico sobre el CTP es aún mayor que el estimado para los camiones livianos eléctricos. Por ejemplo, en el escenario urbano, el costo del camión BYD utilizado como referencia es de USD 252.971 ante un CTP de USD 304.273, un 83,1%. Se observa entonces la relevancia en la elección del camión a utilizar. A la importancia de sus prestaciones técnicas, hay que añadir el impacto relevante de cambios en el precio del vehículo sobre la conveniencia económica, siendo este valor el que mayor peso tiene en el CTP y al encontrarse una diferencia muy baja en los costos actualizados de las dos opciones en comparación.

La incidencia del conjunto de las inversiones iniciales no difiere significativamente a lo señalado para camiones livianos. Las conclusiones expresadas antes se mantienen, un alto porcentaje del CTP se explica por estas inversiones, que tienen un alto grado de certidumbre. Por otro lado, las variables futuras, como lo son el consumo energético, los costos de mantenimiento o los seguros, afectan poco el CTP asegurando su baja variabilidad.

El valor residual de los camiones no parece en principio un valor bajo ni que pueda predecirse con mucha certeza, aun así, el CTP es poco sensible a cambios en esta variable. En el caso de los camiones eléctricos asciende a USD 104.618, casi USD 40.000 más que los convencionales. Sin embargo, el valor residual se registra al final del período evaluado, y descontado al presente dicha diferencia se reduce prácticamente a la mitad. A mediada que el uso de estos vehículos se generalice, se produzcan y comercialicen en mayores cantidades, es de esperar que el precio de los vehículos eléctricos se reduzca y la diferencia entre el valor los dos tipos de vehículos se achique. Se espera que el costo de las baterías continúe decayendo y que la tecnología de camiones eléctricos pesados madure y aumente su adopción, lo cual llevará a los fabricantes a reducir costos. Por ejemplo, si se observara una reducción del valor residual del camión eléctrico de 20%, disminuiría a la mitad la diferencia entre su precio y el de los camiones convencionales. Este cambio implicaría apenas una variación del CTP de los camiones eléctricos de entre un 2,9% y un 3,7%, mostrando su baja sensibilidad a esta variable.

Para los recolectores traseros diésel, el peso del costo de los vehículos en el CTP es superior al que registraban los camiones livianos. Por otro lado, aunque con un peso menor, el costo energético sigue siendo la variable ante la que el CTP es más sensible, representando en los casos analizados 50% y 58%.

A modo de ejemplo, en el escenario suburbano, el CTP del vehículo eléctrico era USD 22.952 inferior al CTP del vehículo convencional. Bastaría una reducción en el precio del Gasoil a partir del año 1 de 9,6% para que ambos se igualaran y ambas opciones fueran económicamente indiferentes

Como ya se afirmó, la muy baja diferencia entre el CTP de las dos opciones consideradas, tanto en zona urbana como en suburbana, no permiten ser concluyente sobre la conveniencia económica de una u otra. La sensibilidad ante cambios menores en el costo del Gasoil, una variable futura sobre la que no se tiene control alguno, reafirman dicha conclusión.

Otra posibilidad a analizar, asumiendo que la vida útil de los vehículos es de 15 años, es ampliar el horizonte temporal del análisis a dicho plazo, incluyendo un recambio de batería a los 8 años. Tomando como referencia la evolución proyectada a futuro del costo de las baterías, tomaremos un valor de 100 USD/kWh. Se asume también valores residuales nulos para ambos vehículos, manteniendo los VR de las baterías. Esta modificación del horizonte temporal de la evaluación mejora la conveniencia de la opción eléctrica entre un 6% y un 7%, aunque sin variar cuál era la opción más conveniente, manteniendo las conclusiones enunciadas anteriormente.

CTP a 8 años			CTP a 15 años		
	Urbano	Suburbano		Urbano	Suburbano
Eléctrico	304.273	392.221	Eléctrico	408.499	539.495
Diésel	281.866	415.173	Diésel	403.958	602.516
Dif % Elec. vs Diésel	7,9%	-5,5%	Dif % Elec. vs Diésel	1,1%	-10,5%

Tabla 23 – Costo Total de Propiedad de recolectores traseros con horizontes temporales de 8 y 15 años

Por último, podría evaluarse un cambio en la tasa de descuento, tasa que refleja el costo de financiamiento y/o el costo de oportunidad del dinero destinado al proyecto en estudio. Como se mencionó, se utilizó en el análisis un 8% anual, un valor muy frecuente en este tipo de estudios, pero pueden encontrarse trabajos similares con valores algo más bajos. Si se redujera dicha tasa se verían favorecidas las opciones de vehículos eléctricos, aunque con un impacto relativamente bajo. Se beneficiarían a las opciones eléctricas, ya que estas concentran los mayores egresos en el momento inicial, en tanto el flujo de los vehículos convencionales presenta los egresos más distribuidos en el tiempo, los que se actualizarían con una menor tasa, incrementando más el CTP. Pero el impacto sería bajo dado el gran peso relativo de las inversiones iniciales. A modo de ejemplo de la magnitud del impacto, si se bajara la tasa de descuento al 6%, para los traseros operando en el escenario suburbano el CTP del camión eléctrico aumentaría un 1,1% en tanto el del camión convencional lo haría en un 4,7%.

Evaluación económica para operadores privados

En varios departamentos hay servicios de recolección que están tercerizados y son llevados adelante por operadores privados.

La evaluación desde el punto de vista de estos operadores tendría inversiones y egresos muy similares a los planteadas para las Intendencias, con algunas diferencias que no son significativas como para afectar los resultados, a excepción de lo que refiere el régimen de promoción de inversiones.

Como se verá en el capítulo siguiente, toda empresa privada que tribute IRAE pueden presentar proyectos de inversión ante COMAP, ampararse en el régimen de promoción de inversiones enmarcado en la Ley 16.906 y regulado actualmente por el Decreto Reglamentario 26/8/020, y obtener importantes exoneraciones fiscales.

Entre las exoneraciones que podría obtener se incluye:

- la exoneración del Impuesto al Patrimonio sobre todos los bienes muebles adquiridos en el proyecto, vehículos incluidos, por toda su vida útil y de la obra civil incluida en el proyecto por entre 8 y 10 años.
- la exoneración de todas las tasas y tributos a la importación, incluido el IVA, a todos los bienes muebles de activo fijo, incluidos vehículos y equipo.
- Exoneración del IRAE por un porcentaje de la inversión

El porcentaje de exoneración del IRAE, el beneficio más significativo del régimen se determina en función de una matriz de indicadores, que refleja la contribución del proyecto a objetivos de la política pública.

Entre estos objetivos se encuentra la incorporación de tecnología limpia, incluidos vehículos eléctricos. Solamente por incorporar vehículos eléctricos, y que estos representen al menos el 50% de la inversión total en activos fijos y obra civil, se asegura una exoneración del IRAE del 42,44% de la inversión total del proyecto en activos fijos. Este porcentaje se puede aumentar aportando a otros indicadores, por ejemplo, incorporando mano de obra, capacitando personal de la empresa o incluso si la inversión se realiza en departamentos que otorgan mayores puntajes por descentralización, entre otras posibilidades.

También podría la empresa privada presentar proyecto ante COMAP con la inversión en vehículos convencionales. Pero este tipo de vehículos no contribuye a ningún indicador que genere puntaje y por ende exoneraciones. Para obtener estas exoneraciones debería contribuir a otros indicadores, por ejemplo, generando empleo. Pero todo lo que haga generar puntaje antes inversión de camiones convencionales, también la generaría mayor puntaje y exoneración en la inversión de camiones eléctricos. Es decir, por incorporar camiones eléctricos hay un diferencial importante en la exoneración del IRAE.

Pero las mayores exoneraciones que se obtendrían si se invirtiera en camiones eléctrico no se generan solamente por el mayor porcentaje de exoneración de IRAE. El beneficio se calcula como porcentaje de la inversión en activos fijos, que como ya fue calculada es sensiblemente mayor cuando se trata de vehículos eléctricos. En la opción eléctrica, la inversión (vehículos, cargadores y conexión) es un monto mucho mayor, aproximadamente el doble, que la inversión en la opción convencional, donde la mayoría de los egresos corresponden a costos operativos.

Por ejemplo, en el camión convencional, en el escenario urbano, el monto de la inversión representa el 93% del CTP. Exonerar, en el caso del porcentaje mínimo, el 42% de esta inversión implicaría una

exoneración del 39,5% del CTP. De esta forma, la opción eléctrica sería conveniente sobre la tradicional en cualquiera de los escenarios planteados.

Vale la pena mencionar que algunas empresas privadas pueden ya tener proyectos de inversión promovidos, por lo cual podrían haber obtenido exoneraciones importantes del IRAE pendientes de usufructuar, y por ende no tienen posibilidad de aprovechar nuevas exoneraciones.

9 Factibilidad Técnico - Financiera

Autonomía de la batería de los diferentes modelos disponibles

La capacidad de las baterías puede variar en rangos debido a que la cantidad de módulos por camión es configurable en algunos fabricantes. Para los camiones compactadores las capacidades relevadas varían entre 180 a 565 kWh.

La mayor cantidad de ofertas varían en el rango entre 200 y 300kWh, lo cual es suficiente para realizar los mismos circuitos que la flota tradicional. En todo caso, la capacidad de las baterías es configurable para adaptar al uso que se requiera, pero pagando el costo en una mayor inversión y mayor peso de batería. Estas capacidades requieren baterías entre 1,5 y 2,5 toneladas.

Como es de esperar, para los camiones furgón, las capacidades son mucho menores ya que se trata de camiones mucho más livianos.

Modelo eléctrico	Tipo de camión	Tamaño Batería (kWh)
BYD T018C01	Compactador carga trasera	229
BYD 6R Clase 6	Compactador carga trasera	211
BYD 8R	Compactador carga trasera	280
BYD modelo T8	Compactador carga trasera	218
EnelX Chile	Compactador carga trasera	314
Experiencia Suiza	Compactador carga trasera	270
FULONGMA FLM5100ZYSNJBEV	Compactador carga trasera	162
FULONGMA FLM5180ZYSNJBEVK	Compactador carga trasera	218
Irizar ie urban track	Compactador carga trasera	307-512
MACK LR Electric Clase 8	Compactador carga trasera	376
Mercedes-Benz eActros	Compactador carga trasera	336
Mercedes-Benz eEconic	Compactador carga trasera	336
Renault Trucks D Wide Z.E.	Compactador carga trasera	200-565
Scania modelo 25L	Compactador carga trasera	297
Volvo FE Electric	Compactador carga trasera	280-375
Volvo FM Electric	Compactador carga trasera	180-540
FARIZON H9E-8T	Furgón	107
FUSO CANTER	Furgón	83
JAC 1063 EV1 urb	Furgón	97

Tabla 24 - Capacidades de las baterías de los camiones relevados

En algunos casos los fabricantes especifican la potencia máxima de carga en las hojas de datos técnicos. Se muestran los casos encontrados. Estas potencias máximas caen bajo el esquema de carga rápida y en todos los casos se trata de cargadores DC. Con estas potencias es posible realizar cargas del 60% de la batería en menos de 1 hora, y una carga completa en 2 horas o menos. Debe tenerse en consideración que la carga de las baterías en general no puede realizarse de forma lineal hasta el 100% de la capacidad. Es posible asumir una carga lineal hasta un 80%, luego la potencia de carga cae gradualmente hasta alcanzar el 100%. En algunos casos los fabricantes dan información

de cuánto tiempo demora una carga completa a la máxima potencia de carga admisible. Estos factores resultan en un tiempo de aproximadamente el doble del requerido si la carga fuera lineal entre 0 y 100%. Se debe verificar si esto también se cumple para potencias de carga menores a la máxima.

- MACK LR Electric Clase 8 – Potencia máxima del cargador 150kW
- Mercedes-Benz eActros y eEconic - Potencia máxima del cargador 160kW
- Irizar ie urban track – Potencia máxima del cargador 350kW
- Scania modelo 25L - Potencia máxima del cargador 375kW
- Volvo FE y FM Electric - Potencia máxima del cargador 250kW
- BYD T018C01 - Potencia máxima del cargador 200kW

El proceso de carga, y otros factores como la temperatura ambiental, afectan a la batería, reduciendo su capacidad y limitando su vida útil. Equilibrar el envejecimiento de la batería con los requisitos operativos es un compromiso. Cuanto menos estrés se ponga en la batería, más larga será su vida útil. Una tasa de carga más lenta, por ejemplo, es menos perjudicial que una carga rápida. El kilometraje anual, la temperatura, la estrategia de uso de la batería y la profundidad de descarga (DOD) también afectan el envejecimiento de la batería.

Debe tenerse en cuenta que la capacidad de la batería completa no es el valor que deba considerarse como capacidad útil de trabajo. De la capacidad total se le debe descontar una capacidad no utilizable que corresponderá a las pérdidas por conversiones de energía, efectos de la temperatura, entre otros factores, otra parte de la capacidad se debe reservar para el proceso de envejecimiento (capacidad mínima requerida al final de la vida útil, dependerá de lo que el usuario requiera, lo cual también afectará la capacidad requerida o los años de vida útil), otro porcentaje se debe reservar como autonomía de respaldo y para extender la vida de la batería lo máximo posible. Este porcentaje debería ser del 20%.

En ningún caso los fabricantes ofrecen información de que esperar en cuanto a la degradación de la batería. Sin embargo, al momento de determinar la solución, el fabricante requerirá conocer la autonomía requerida, características del recorrido y vida útil esperada para dimensionar la capacidad de la batería. En algunos casos los fabricantes pueden especificar la capacidad total de las baterías y la capacidad usable. En el caso del Mercedes Benz eActros 300 especifica una capacidad usable de 291 kWh y una capacidad instalada de 336 kWh, lo cual significa un 87% usable/total.

Asumiendo una capacidad utilizable de la batería del 90%, luego otro 20% de capacidad mínima de margen y para alargar la vida útil de la batería, y otro 10% reservado para la depreciación de la batería, resulta en una capacidad utilizable del 60%. Sin embargo, debe considerarse también que el frenado regenerativo permite recuperar parte de la energía utilizada. En este caso se utilizó como referencia entre el 12% y 30% de recuperación, lo cual efectivamente extiende la capacidad de la batería. El efecto del frenado regenerativo se traducirá en el valor del rendimiento del camión eléctrico en kWh/km. Este indicador será el valor determinante para definir la capacidad necesaria

de la batería. Como no es posible conocer este valor a priori³, se debe asumir y dimensionar la batería contando con un margen adicional debido al rendimiento. La experiencia de un proyecto piloto con variedad de recorridos puede mejorar la determinación de este parámetro.

Requerimientos de infraestructura para la carga eléctrica

Los requerimientos de infraestructura dependerán del tamaño de flota, características de los camiones, de los circuitos y la programación.

En todos los casos, se considera la carga exclusivamente en un único sitio donde el camión puede estacionarse durante la noche. Se tiene en cuenta que se requerirá de la contratación de un nuevo suministro eléctrico dedicado exclusivamente. Además, no se considera la utilización de la infraestructura de carga pública debido a efectos prácticos. También se descarta en principio para este análisis, la carga en los SDF. Esta opción podría ofrecer flexibilidad en algunos escenarios, especialmente para las intendencias que tienen un sitio centralizado.

Sistemas de carga comunes

- Tipo 2 (solo para carga AC)

Generalmente utilizado para vehículos pequeños. La salida máxima de potencia de un sistema estándar está limitada a 22 kW. Estos podrían utilizarse para el caso de los furgones si se cuenta con suficiente tiempo de carga (se debe disponer de al menos 6 horas) según la programación de uso del vehículo.

- Sistema de Carga Combinada (CCS)

CCS suministra corriente AC y DC a través de un solo cable y un sistema de conector estandarizado al vehículo. La carga de alta potencia que proporciona la velocidad de carga necesaria para vehículos comerciales solo es posible en DC. Salida máxima de potencia 600 kW. Para los camiones de carga trasera evaluados se deberán usar estos equipos.

Los fabricantes ofrecen soluciones a partir de 20 kW y se pueden encontrar opciones en varias capacidades. Típicamente se utilizan 30, 60, 90, 120, 150 y 180 kW. Los equipos vienen en módulos independientes y pueden obtenerse en la modalidad con 2 conectores para tener la opción de cargar un vehículo a la potencia completa o dos a la mitad de potencia. En el caso de varios vehículos, se puede optar por adquirir varios módulos independientes o una solución centralizada (360 kW, 480 kW, 600 kW), que se conecta a varios dispensadores.

En el caso de cargar una flota se deberá contar con un sistema de gestión de carga que pueda controlar cada cargador y permite realizar varias gestiones como el manejo de los horarios, perfiles de carga, carga requerida por vehículo, hora de salida de cada vehículo, entre otras funcionalidades.

³ Ver anexo 2 en sección 12 de este informe para más detalles sobre el rendimiento.

Para los casos de estudio de este trabajo se evaluó un camión de 229 kWh, requiriendo realizar una carga de 170 kWh por turno. Se asume un tiempo disponible de carga de 7 horas en la noche y 3 horas en el día, por lo que se tuvo en cuenta cargadores con una capacidad mínima de 80kW para el caso de los camiones de carga trasera. Esta evaluación solo considera un camión independiente. En el caso de una flota mayor, se deberá diseñar la solución que optimice los costos. Si la programación de los circuitos requiere de una carga intermedia durante los cambios de turnos, esta se podría realizar a potencias de cargas rápidas en tiempos cortos.

Para las potencias consideradas, es altamente probable que el suministro de energía que UTE ofrezca sea en baja tensión en 400V. Debido a esto solo se tuvo en cuenta la tarifa MC1. Lo cual también implica menos costos asociados a la contratación, ya que no se requiere invertir y realizar el mantenimiento en una subestación propia en media tensión.

La inversión estará compuesta de 4 componentes:

- Solicitud de suministros nuevo a UTE. Para cualquier capacidad por encima de 50kW UTE realiza un estudio para determinar los costos asociados a la entrega de esta capacidad. Lo cual puede resultar en un rango de inversión muy alto, según las características del sitio donde se requiera la instalación. Se asume que se solicita dentro de ciudades por lo que no habría grandes dificultades para acceder a estas capacidades.
- Adquisición de los cargadores.
- Mano de obra de instalación de los cargadores.
- Infraestructura no eléctrica (pavimentación, techos, cercas, oficinas, vestuarios, etc.).

Cadena de suministro de vehículos y repuestos

Para el estudio de la cadena de suministros de vehículos y repuestos, se mantuvieron entrevistas con las empresas más relevantes existentes en el mercado uruguayo, las cuales se mencionaron el capítulo 7 y que se resumen a continuación en la siguiente tabla:

Empresa	Marca representada
Autolider	Mercedes Benz
Jose Maria Duran	Scania
Mekatronik (Grupo CIR)	Volvo
Lestido	Volkswagen / MAN
Homero de Leon	Foton (camiones chicos)
Foton Daimler Uruguay	Foton (camiones grandes)
Grupo Barriola	Dong Feng
Santa Rosa	Iveco / Renault /JMC /Farison
Paleson	Ankai
Sadar	BYD
Grupo Fiancar	JAC
Abriley	MAXUS

Tabla 25 - Entrevistas mantenidas con comercializadores

En las reuniones mantenidas con los distintos proveedores, se pudo contar de primera mano con información técnica y económica para los camiones eléctricos livianos con furgón y de los camiones eléctricos con equipos recolectores traseros. A su vez se pudo conocer cómo se han venido preparando estas empresas para poder cumplir con las necesidades de los clientes en lo que refiere a servicio post venta y suministro de repuestos para este tipo de camiones.

Para el primer caso, el camión eléctrico liviano con furgón se trata de un producto estándar el cual viene con el furgón montado en fábrica y pronto para funcionar. El vehículo evaluado en este estudio, el JAC 1063EV, es el camión eléctrico con más unidades vendidas en el país y las primeras unidades llegaron a Uruguay en 2021, por lo que ya hay generado un “know how” importante en cuanto a su funcionamiento, roturas típicas y stocks a mantener. Este camión viene con una garantía de 3 años en el camión (o 100.000 kms, lo que suceda primero) y 8 años en la batería lo cual es un respaldo para el comprador ante cualquier eventualidad.

La marca JAC es una marca que se ha consolidado en Uruguay obteniendo el primer lugar en ventas de camiones livianos por más de 10 años consecutivos, según datos de la Asociación del Comercio Automotor del Uruguay. Cuenta además con amplio stock de repuestos y respaldo post venta en todo el país, a través del Grupo Fiancar, el cual cuenta con más de 35 años de trayectoria en el mercado.

En cuanto al plazo de entrega de este tipo de camiones, depende de varios factores pero al ser un vehículo estándar de fábrica, los plazos de entrega por lo general no superan los 90 a 120 días desde emitida la orden de compra, salvo el proveedor posea stock para entrega en zona franca en cuyo caso los plazos son mucho menores.

El segundo caso, el de los camiones eléctricos con equipo de recolección trasero es un poco diferente. Tomando el camión BYD T018 que se utilizó en la evaluación económica, al ser un vehículo que no es estándar, que requiere determinados ajustes en fábrica, el montaje del equipo en Uruguay y las pruebas correspondientes, el plazo de entrega estimado por la empresa es de 215 días en Uruguay.

En principio y en forma preliminar se ofrece por parte de BYD una garantía de 2 años en el camión (o 100.000 kms, lo que suceda primero) y 5 años en la batería (o 500.000 km) para un estado de carga (S.O.C) de 60%. Se establece una garantía mayor para el sistema de alto voltaje y tren motriz que es de 5 años o 400.000 km.

Estimación de costos operativos y fallas más frecuentes

En el capítulo 8 (Evaluación Económica) se realizó el análisis económico y se explicitaron los costos de inversión y operativos referidos a la operación de camiones convencionales y camiones eléctricos.

Para el análisis de costos no se tomaron aquellos costos que a los efectos de la comparativa no variaban entre una y otra opción, como por ejemplo los salarios de chofer y operadores, de funcionarios administrativos o el mantenimiento del equipo de compactación que en ambas opciones (eléctrico y convencional) son los mismos.

A modo resumen se detalla a continuación como se conforman los costos operativos y los supuestos utilizados para los cálculos realizados para el Costo Total de Propiedad:

Camión Diesel	
Descripción	Fuente de calculo
Costo de combustible	Real en base a consumo de camiones diesel
Seguros	Real en base a datos intendencias (Seguros por flota)
Mantenimiento Preventivo (Servicios)	Información de representantes
Mantenimiento Correctivo y otros	Estimado a partir de buenas prácticas de mantenimiento en comparación Preventivo vs Correctivo

Tabla 26 - Costos operativos considerados para el CTP caso diésel

Camión Eléctrico	
Descripción	Fuente de calculo
Costo electricidad	Calculado en función de tarifario UTE , de rendimientos y recorridos proyectados para los distintos escenarios.
Seguros	Real en base a datos intendencias (Seguros por flota)
Mantenimiento Preventivo (Servicios)	Estimado como porcentaje del Mantenimiento de camiones Diesel
Mantenimiento Correctivo y otros	

Tabla 27 - Costos operativos considerados para el CTP caso eléctrico

En lo que refiere a los costos de mantenimiento, las intendencias (no así algunas empresas privadas) tienen poca trazabilidad acerca de los costos que gastan en sus flotas en forma discriminada por vehículo, por tipo de mantenimiento, etc. En reuniones con representantes informan sobre la dificultad para estimar los costos de mantenimiento correctivo ya que dependen de muchos factores como la correcta operación, el cuidado por parte de los choferes y operadores, la realización de las rutinas de mantenimiento en tiempo y forma, entre otras variables. De hecho, se les ha presentado la oportunidad de cotizar el mantenimiento total (preventivo y correctivo) de determinadas flotas y no han logrado hacerlo por el desafío y alta variabilidad (y por tanto riesgo) que esto tiene.

Por otro lado, para el caso de camiones eléctricos, la escasa experiencia hasta el momento, donde no hay flotas grandes ni con la antigüedad suficiente hacen muy difícil obtener estimaciones basadas en datos reales. Por lo que se utilizaron valores estimados que se vienen utilizando en distintos estudios de referencia a nivel académico.

En cuanto a las fallas más comunes que pueden darse en los camiones eléctricos, de acuerdo con lo informado por las empresas representantes y de las experiencias recabadas en este trabajo, se pueden resumir en la siguiente tabla:

Sistema	Defecto o Falla	Causa
Baterías	Problemas de carga	Fallas en el sistema de carga del camión, conectores o cables dañados o en los cargadores.
	Sobrecalentamiento	Por uso intensivo, altas temperaturas ambiente durante cargas rápidas
	Degradación	Asociada al tiempo y a los ciclos de carga/descarga
Sistema eléctrico	Tabla 28 – Fallas más comunes en camiones eléctricos Falla en sistema BMS	Falla de componentes electrónicos o problemas de software
	Falla en Sistema de control del motor	Fallas en los inversores, controladores del motor o software
Motor eléctrico	Problemas de funcionamiento o bajo rendimiento	Desgaste natural o falla de componentes individuales internos
Sistema de refrigeración	Sobrecalentamiento	Falta de mantenimiento (limpieza) o fugas de refrigerante
Sistemas auxiliares	Falla en aire acondicionado	Perdidas de refrigerante, falla de componentes individuales
	Sistema de frenos	Desgaste natural o fallas en componentes
Neumáticos	Desgaste excesivo	Debido a una aceleración excesiva en las salidas
Suspensión	Desgaste excesivo o roturas de componentes de la suspensión	Cargas por encima de la carga de diseño del camión, falta de mantenimiento o conducción frecuente en terrenos muy irregulares

Vida útil de los vehículos y sus baterías

La vida útil de las baterías de un camión eléctrico depende de varios factores, como ser la tecnología de la batería (por ejemplo LFP, NCM, NCA, etc.), la calidad de estas o las condiciones de operación y de mantenimiento.

En general los factores más importantes que determinan que una batería tenga mayor vida útil son:

- **Ciclos de carga y descarga:** Las baterías tienen un número limitado de ciclos de carga y descarga antes de que su capacidad comience a degradarse.
- **Temperatura de operación:** Las temperaturas extremas, tanto altas como bajas, pueden disminuir la vida útil de una batería.
- **Carga rápida:** La carga rápida podría acelerar el desgaste de la batería en comparación con la carga lenta. Esto es debido a que cargas rápidas implican temperaturas altas.
- **Mantenimiento:** Un buen mantenimiento puede extender la vida útil de la batería.

A lo largo de este trabajo surgieron interrogantes acerca de cómo se vería afectada la vida útil de las baterías en camiones que circularan en caminos de tierra, comunes en algunas localidades del interior, donde las mismas queden sujetas a vibraciones e ingreso de tierra.

En general, hablando de baterías de adecuada calidad, las mismas vienen selladas para no permitir el ingreso de agua o tierra por lo que la única precaución al trabajar en entornos con mucha tierra es realizar un adecuado mantenimiento (limpieza) al sistema de refrigeración periódicamente.

En cuanto a las vibraciones, los packs de baterías de buena calidad van montados en soportes antivibraciones que absorben impactos y vibraciones en múltiples ejes [25]. A su vez, las celdas van montadas en polímero aislante que impide el movimiento dentro de la carcasa de la batería.

Otro de los puntos relevantes es el efecto de la carga rápida en la vida útil de las baterías. Por lo general los usuarios de flota cargan durante la noche, cuando no requieren el camión funcionando y cuentan con un amplio margen de horas en las bases de operación para realizar una carga lenta de baja potencia. No obstante, las condiciones de operación pueden requerir el uso de cargas rápidas a lo largo del día, por lo general en el entorno de 2 horas, que permitan asegurar determinada autonomía para cumplir con las tareas del día.

El proceso de carga rápida está regulado y coordinado por la comunicación entre el cargador externo DC y el BMS del camión. Al alcanzar un determinado porcentaje de carga, generalmente en el entorno del 75 a 80% (lo cual se puede ajustar), automáticamente se ajusta el proceso de carga para evitar exponer la batería a tensiones o sobrecalentamientos innecesarios.

Se han realizado diversos estudios a nivel mundial para estudiar si realmente hay un efecto considerable en la vida útil de las baterías sometidas a procesos de carga rápida frecuentes.

A modo de ejemplo se citan los siguientes estudios:

Empresa	Año	Cantidad de vehículos estudiados	Conclusiones
Geotab	2024	6.300	Degradación promedio 2,3% anual y 1,6% bajo condiciones de carga y temperaturas ideales. El impacto de la carga rápida no es significativo en la vida útil total de la batería.
Recurrent	2024	13.000	No hay un efecto negativo significativo por la utilización de cargas rápidas en alternancia con cargas lentas en la vida útil de las baterías. Los efectos pueden verse recién hacia el fin de la vida útil.

Tabla 29 - Estudios sobre el efecto sobre las baterías de la carga rápida

Los fabricantes de baterías y vehículos eléctricos vienen mejorando cada día las tecnologías de gestión de baterías y métodos de carga de modo de optimizar el equilibrio entre velocidad de carga y vida útil de las baterías. Para esto vienen implementando mejoras tanto en la química y construcción de las baterías, en los sistemas de refrigeración y en la mejora de los algoritmos de carga inteligente.

En todo caso resulta más importante a los efectos maximizar la vida útil de las baterías tener en cuenta las recomendaciones de los fabricantes en cuanto a no realizar cargas rápidas bajo condiciones extremas de temperatura o dejar descargar la batería por debajo del 20% de su capacidad nominal, siendo el rango óptimo de funcionamiento entre el 20 y el 80%.

A los efectos de este trabajo, donde los modelos evaluados presentan baterías LFP (Fosfato de Hierro y Litio) se consideró una vida útil de 8 años que coincide con el periodo de garantía por lo general ofrecido por los fabricantes para las mismas.

Después de este periodo no quiere decir que la batería no se pueda utilizar más, pero no es capaz de asegurar las condiciones de autonomía para los cuales fue diseñada. Se define SOH (State of Health) de una batería como el porcentaje entre la carga máxima de la batería y su capacidad original dada por el fabricante.

Una vez cumplida la vida útil de la batería para el camión, no quiere decir que la misma pasa a requerir su disposición final si no que es posible pensar en soluciones de “segunda vida” para aprovechar la capacidad de esta. En este sentido, existe y es positivo un valor residual para la batería una vez llegada su vida útil.

Las soluciones más utilizadas siguen dos líneas principales: el refurbishing que busca utilizar las celdas para otros vehículos de menor porte y el repurposing (reproposito) que utiliza las celdas para otras aplicaciones, como por ejemplo almacenar energía en bancos de batería.

También existe la posibilidad de reciclar las baterías para obtener sus materiales originales y crear nuevas celdas, aunque es más compleja que las anteriores desde el punto de vista del enfoque de negocio.

El valor de la batería dependerá de la química, modelo de la celda y su estado de deterioro. Aun no hay experiencia suficiente para establecer dicho valor residual, pero al fin de la vida útil se espera más del 50% de la capacidad de batería para aprovechar, por lo que es posible asumir valores de 10% o 20% del valor inicial de la batería para este análisis.

Requerimientos de seguridad adicionales en comparación con los vehículos no eléctricos

Los camiones eléctricos presentan algunas diferencias en cuanto a los requerimientos de seguridad en comparación con los camiones convencionales de combustión interna. Se deben considerar los siguientes aspectos básicos para el trabajo con este tipo de vehículos:

- **Capacitación del personal**

Todos los operadores, conductores y personal de mantenimiento deben recibir una adecuada capacitación sobre los riesgos específicos asociados con la operación, carga y mantenimiento de los camiones eléctricos y las medidas de seguridad correspondientes. Los conductores deben ser conscientes del peligro que implica el daño de una batería para evitar maniobras que puedan ser riesgosas para un vehículo eléctrico que para un diésel no lo sea. Esto implica básicamente conducir el camión solo en caminos firmes, evitar suelos blandos y desniveles pronunciados.

Los camiones eléctricos están equipados con sistemas de diagnóstico y advertencia para alertar a los conductores y al personal de mantenimiento sobre cualquier falla o anomalía en el sistema eléctrico, como sobrecalentamiento de la batería o fallas en los componentes electrónicos. Dichas personas deben estar familiarizadas con los mismos y deben saber cómo actuar en caso de encontrarse con un mensaje de este tipo.

Del mismo modo deben estar familiarizados con las etiquetas de seguridad ubicadas en los distintos componentes del camión, así como también en la normativa de colores utilizada para los diferentes cables, que indican la tensión utilizada en los mismos. Como norma general se utiliza el color naranja para identificar los conductores de alta tensión del camión, que se utilizan para tensiones que van desde los 400 a los 800 V.

- **Sistemas eléctricos de alto voltaje**

Los camiones eléctricos cuentan con sistemas eléctricos de alto voltaje que requieren precauciones adicionales. Es esencial que los técnicos estén capacitados y tengan las herramientas y equipos de protección personal (EPP) adecuados para trabajar de manera segura con estos sistemas.

Además de los equipos de protección básicos que deben utilizarse en el mantenimiento de camiones convencionales se debe incorporar el uso de elementos de protección adicionales o con características específicas para el trabajo con los sistemas del camión eléctrico. A modo de ejemplo se cita la necesidad de contar con zapatos de seguridad dieléctricos, alfombras dieléctricas, de guantes aislantes para proteger contra descargas eléctricas y todas las herramientas a utilizar (destornilladores, pinzas, llaves, etc.) deben contar con adecuada aislación eléctrica.

Es muy importante garantizar un adecuado aislamiento eléctrico en todas las partes del camión durante su vida útil, evitando modificar la configuración original de fábrica para prevenir descargas eléctricas en caso de contactos accidentales con componentes electrificados.

- **Manejo seguro de las baterías de alta tensión**

Las baterías de los camiones eléctricos son de gran tamaño y peso, y pueden representar un riesgo en caso de accidente. Si se requiere desinstalar una batería, dado su alto peso, es necesario contar con una plataforma hidráulica tipo tijera específica para tal fin y se deben tener las precauciones correspondientes a nivel eléctrico. En ese sentido, se deben implementar procedimientos seguros para el manejo de las baterías, incluida su instalación/ desinstalación, mantenimiento, carga y disposición final.

- **Infraestructura de carga**

La infraestructura de carga para los camiones eléctricos debe cumplir con estándares de seguridad específicos para prevenir riesgos como cortocircuitos, sobrecargas o sobrecalentamiento durante el proceso de carga.

- **Protección contra cortocircuitos y sobrecargas**

Debido a la alta tensión de los sistemas eléctricos, es importante contar en las instalaciones con dispositivos de protección adecuados para prevenir cortocircuitos y sobrecargas que podrían causar incendios o daños en la batería y en el camión.

- **Protección contra incendios**

Se debe contar con una instalación de taller que cuente con protección contra incendios habilitada por la Dirección Nacional de Bomberos teniendo en cuenta que se va a trabajar con vehículos eléctricos.

En particular, además de los extintores y sistemas de protección usualmente requeridos para este tipo de talleres, se deberá contar con extintores del tipo D en cantidad y capacidad adecuada. Este tipo de extintores son específicamente diseñados para incendios que involucran metales combustibles como el litio (de uso común en las baterías de vehículos eléctricos).

En este sentido, todo el personal del taller deberá contar con capacitación en el manejo de extintores y en procedimientos de emergencia específicos para incendios relacionados con la electricidad.

Incentivos financieros existentes

Uruguay viene impulsando desde hace años la movilidad eléctrica, como parte de la segunda transformación energética, para lo cual son diversos los instrumentos de estímulo e incentivo a la incorporación de flota eléctrica en los diferentes subsectores de actividad.

En este contexto, el país presenta condiciones favorables para el recambio de flotas y la electrificación de estas. Esto abarca tanto al transporte de pasajeros como al transporte de carga.

Entre los instrumentos que se han ido generando para la promoción de la movilidad eléctrica se destacan:

- Exoneración de tasa global arancelaria.

El Decreto 410/16 exonera el pago de la Tasa General Arancelaria (23% del valor del vehículo) para los vehículos con motor eléctrico que provienen de fuera del MERCOSUR.

- Ley de Promoción de Inversiones.

La Ley otorga beneficios fiscales a proyectos de inversión que contribuyan a una serie de objetivos, entre los que se incluye la producción más limpia. En particular, si la empresa presenta un proyecto que incluye la adquisición de vehículos utilitarios eléctricos, obtendrá o aumentará exoneraciones en el IRAE.

- Reducción del Impuesto Específico Interno (IMESI).

Esto se materializó inicialmente a través del Decreto 246/12 para híbridos y eléctricos, y a partir del 1/1/2022, los vehículos eléctricos 0 km estarán exonerados del pago de IMESI, a través de la modificación del Decreto del Ministerio de Economía y Finanzas, Artículo 35 Decreto N96/990.

- Certificados de Eficiencia Energética

Instrumento económico del Ministerio de Industria, Energía y Minería, para premiar las medidas de eficiencia energética realizadas. El beneficio económico equivale a un monto de 3% a 30% de la inversión realizada.

- Bonificación de seguros del Banco de Seguros del Estado para camiones eléctricos.

- Bonificación del 50% en el pago de la patente de rodados para vehículos eléctricos. Aprobado por el Congreso de Intendentes, y renovable anualmente.

Varios de estos incentivos, como la exoneración de la tasa arancelaria o la reducción del IMESI, se ven reflejados en los precios de los vehículos. En tanto las Intendencias pueden tramitar ante el MEF la exoneración de todos los tributos a la importación de vehículos y equipos, obtienen beneficios mayores que los específicos para vehículos eléctricos.

Otros, como la bonificación del pago de la patente o la bonificación en seguros, afectan el CTP desde el punto de vista de un inversor privado, pero no para las Intendencias, ya que estas no abonan patente y obtienen tarifas especiales al asegurar grandes flotas de vehículos. El principal incentivo, con el impacto potencial más relevante y que puede ser determinante en la decisión de inversión de una empresa privada, es el del régimen de promoción de inversiones.

El régimen de promoción de inversiones, establecido por la Ley 16.906 de Promoción y Protección de Inversiones, y regulado en la actualidad por el decreto 268/020, establece beneficios fiscales para inversiones en activo fijo, incluidas las inversiones en infraestructura, equipos y vehículos, siempre que contribuyan con una serie de indicadores. Entre los beneficios fiscales a los que se puede acceder, como la exoneración del Impuesto al Patrimonio sobre bienes muebles (incluidos vehículos) y obra civil, exoneración de tasas o tributos a las importaciones de bienes muebles para activo fijo, se destaca la exoneración del IRAE. El monto de esta exoneración puede alcanzar hasta el 100% del monto total invertido.

Como se demostró anteriormente, los vehículos eléctricos reducen sustancialmente los costos de operación y mantenimiento con relación a los vehículos tradicionales. Sin embargo, los egresos que mayor impacto tienen en el CTP, y que son sustancialmente superiores frente al escenario de utilización de vehículos convencionales, corresponden a inversiones en activos fijos, como el costo del vehículo y las inversiones en infraestructura de carga. Obtener una exoneración de IRAE que represente un porcentaje importante de estas inversiones, reduciría sensiblemente el CTP y podría tener un impacto muy importante en la conveniencia de reconversión de la flota.

Este régimen otorga ventajas a las inversiones en tecnología limpia, incluidas las inversiones en vehículos eléctricos, generando por este solo hecho un alto porcentaje de exoneración del IRAE.

Este beneficio, que puede ser determinante, depende de que quien realice la inversión sea contribuyente de IRAE. Podría aplicar si la inversión la concretara una empresa privada concesionaria de un servicio de recolección, pero no aplica para las Intendencias, razón por la cual no fue incorporado a los flujos elaborados anteriormente.

Requerimientos de capacitación y/o actualización de mano de obra

A nivel de operación, la capacitación de conductores es muy relevante, ya que el rendimiento y vida útil de los vehículos y por ende los costos de operación están vinculados a la destreza de los conductores de este tipo de vehículos.

Por otro lado, a nivel del mantenimiento la capacitación y actualización de mano de obra también es de vital importancia. Hay un cambio de paradigma en cuanto a que los perfiles de mantenimiento para una flota convencional (con motorizaciones a combustión interna) están compuestos en su mayoría por técnicos con formación mecánica y en minoría por técnicos electricistas y en electrónica. En el caso de flotas de vehículos eléctricos se invierte la ecuación, siendo necesarios perfiles que puedan encarar problemas de origen eléctrico/electrónico y que sepan manejar herramientas electrónicas de diagnóstico e informáticas.

A continuación, se presentan los puntos clave a tener en cuenta relativos a la capacitación y actualización de mano de obra, tanto para operadores como para personal de mantenimiento.

Para los conductores de los camiones

En el caso de los conductores será necesario capacitar y entrenar a los mismos sobre cómo operar los camiones eléctricos de manera eficiente de modo de optimizar el rendimiento, maximizar la autonomía y prolongar la vida útil de la batería.

En este sentido, es imprescindible que los conductores tengan un proceso de capacitación, entrenamiento y seguimiento hasta que se acostumbren al manejo de los camiones eléctricos y desarrollen hábitos de conducción eficiente.

Conducción eficiente

Los conceptos de conducción eficiente aplicados a vehículos de combustión interna, aplican igualmente a la conducción de vehículos eléctricos. Mientras que en el primer caso el objetivo es el ahorro de combustible (contribuyendo a reducir las emisiones), en el segundo el objetivo es tener un mejor rendimiento en kWh/km lo que se traduce en una mayor autonomía.

Los conceptos más importantes relativos a la conducción eficiente son:

- Evitar aceleraciones y frenadas bruscas. En teoría estos camiones podrían operar exclusivamente con el frenado regenerativo.
- Mantener una velocidad constante siempre que sea posible, respetando los límites de velocidad.
- Anticiparse a las paradas, minimizando el uso de los frenos.
- Usar los cambios de marcha en forma eficiente.
- Evitar el uso del aire acondicionado cuando no sea necesario.
- Mantenimiento la presión adecuada en los neumáticos.

Uso del freno regenerativo

El uso del freno regenerativo en vehículos eléctricos es otra característica que ayuda a mejorar el rendimiento, maximizar la vida de los frenos y extender la autonomía del vehículo eléctrico.

Los conceptos más importantes a tener en cuenta para optimizar la recuperación de energía de frenado son:

- Siempre utilizar estrategias de frenado suave y progresivo en lugar de frenadas bruscas ya que de este modo el sistema regenerativo recupera más energía
- Anticiparse a las condiciones del tránsito y del camino, desacelerando con tiempo suficiente para que el freno regenerativo pueda funcionar a lo largo de un período más prolongado, recuperando así más energía.
- Aprovechar las pendientes de descenso prolongados, evitando utilizar el freno convencional para permitir que el freno regenerativo funcione plenamente.
- Familiarizarse con los modos de freno regenerativo, ya que algunos vehículos eléctricos permiten ajustar el freno regenerativo a diferentes niveles.

Aspectos de mantenimiento básico

Es muy importante que los conductores estén familiarizados con los aspectos de mantenimiento básico de los camiones, de modo de poder realizar inspecciones diarias para detectar defectos o fallas previo a iniciar un recorrido.

Los puntos básicos para verificar y con los que el conductor debería estar familiarizado son:

- **Neumáticos:** Presión, Desgaste, Cortes, Bultos, etc
- **Luces:** Correcto funcionamiento de todas las luces (faros delanteros, luces de freno, señaleros, etc)
- **Frenos:** Verificar el correcto funcionamiento de los frenos.
- **Computador de a bordo:** Verificar que no existan mensaje de advertencia o fallas.

- **Batería:** Verificar el estado de carga y que la misma permita cumplir con el recorrido asignado.

Para el personal de mantenimiento

Para el personal que trabaje en el mantenimiento de los camiones eléctricos de recolección de residuos, serán necesarios programas de formación específicos para el personal actual y es posible que en algunos casos se deba incorporar personal adicional que posea conocimientos técnicos adecuados al nuevo paradigma de mantenimiento.

Si bien para el mantenimiento de los camiones eléctricos se requiere de personal adecuado a los requisitos anteriores, el menor mantenimiento de dichos camiones hace que se requiera una menor cantidad de técnicos por camión, hay una menor cantidad de partes o repuestos necesarias para tener en stock y un ambiente de trabajo más simple y limpio entre otras ventajas.

De acuerdo con las entrevistas realizadas a los representantes de las principales marcas de camiones en Uruguay, los mismos ya están formando a su personal técnico a través de capacitaciones en el exterior o el envío de técnicos de los fabricantes a Uruguay para brindar capacitaciones del tipo “In Company”.

Inicialmente se prevé que la mayor parte de las tareas de mantenimiento sean realizadas por las empresas representantes, pero con el correr del tiempo, luego de los procesos de capacitación y adquisición de experiencia, muchas de ellas pueden pasar a realizarse por parte de los técnicos propios de los operadores de flota.

Se nombran a continuación los requisitos más importantes en cuanto a capacitación y competencias necesarias para el personal de mantenimiento:

Conocimientos de electricidad y electrónica

Se requiere que todos los operarios que trabajen en el mantenimiento de los camiones eléctricos entiendan los principios básicos de la electricidad y la electrónica y cómo se aplican los mismos en los sistemas de propulsión eléctrica de los camiones.

Manejo seguro de baterías de alto voltaje

Dado que los camiones eléctricos incorporan baterías de alto voltaje, es crucial que todos los operarios comprendan cómo manipularlas de manera segura, incluyendo la conexión, desconexión, la carga, la descarga y el almacenamiento.

Mantenimiento y diagnóstico de sistemas eléctricos

Los técnicos deben ser capaces de identificar y solucionar problemas en los sistemas eléctricos del camión (utilizando herramientas de diagnóstico), incluidas las baterías, los motores eléctricos, los sistemas de control y de gestión de la energía.

Una gran ventaja en los vehículos eléctricos es que el diagnóstico puede realizarse en forma remota utilizando herramientas específicas, por lo que se pueden solucionar a distancia gran parte de las fallas o dar orientación al personal de mantenimiento en sitio para resolverlas.

Actualización tecnológica

Dado que la tecnología de los camiones eléctricos está en continua evolución, los operarios de mantenimiento requerirán actualizaciones periódicas sobre las últimas tendencias y mejores prácticas en el mantenimiento de estos vehículos.

Seguridad en el entorno de trabajo

Los operarios de mantenimiento necesitarán capacitación específica sobre los procedimientos de seguridad relacionados con los camiones eléctricos, incluida la prevención de incendios y la seguridad eléctrica.

Gestión y análisis de datos

Con la creciente digitalización de los vehículos, los trabajadores deben contar con habilidades básicas en la gestión de datos y capacidad de análisis para interpretar la información proporcionada por los sistemas de telemetría y de diagnóstico de los camiones.

Oferta local de capacitación

A nivel formal se destaca la creación en 2023 del Bachillerato Profesional de Electromovilidad impartido por la Universidad del Trabajo del Uruguay (UTU) con una duración de un año que se dicta para egresados de la Educación Media Profesional en Mecánica Automotriz o Educación Media Profesional en Electricidad Automotriz.

En la misma línea, la Facultad de ingeniería de la Universidad de la República viene dictando cursos de posgrado/educación permanente en “Vehículos híbridos, eléctricos y a hidrógeno” y de “Baterías aplicadas a la Movilidad Eléctrica”.

Por otro lado, el 3 de mayo de 2024 se llevó a cabo la firma de un importante acuerdo sobre perfiles ocupacionales en Electromovilidad, el cual involucra al Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM), la Universidad del Trabajo del Uruguay (UTU), el Instituto Nacional de Empleo y Formación Profesional (INEFOP) y la Cámara de Comercio e Industria Uruguayo-Alemana (AHK).

Dicho acuerdo se centra en el desarrollo de 9 perfiles formativos en electromovilidad, agrupados en cuatro categorías:

- Gestión de energía y baterías. Gestor de batería, Mantenimiento-instalador de puntos de carga domiciliaria y Mantenimiento-instalador de puntos de carga públicos.
- Operación de transporte público. Conductor de ómnibus y Despachador de flotas.
- Mantenimiento de vehículos. Mantenimiento eléctrico de vehículos de transporte público, Mantenimiento integral de vehículos eléctricos menores y Mantenimiento mecánico de vehículos de transporte público.
- Ocupacional transversal. Personal de servicios de emergencia y asistencia a vehículos eléctricos.

El objetivo del acuerdo es "reconocer los perfiles ocupacionales y módulos como insumos relevantes para la adecuación y diseño de las carreras y programas de estudio técnico-profesionales vinculados con la movilidad eléctrica, así como para el diseño de los cursos de capacitación en el marco de los programas de formación continua."

Se entiende que con la firma de este acuerdo se inicia un importante camino de fortalecimiento de las capacidades locales de mano de obra especializada requerida para la exitosa operación y mantenimiento de flotas de vehículos eléctricos.

10 Recomendaciones para la transición a VE en la gestión de residuos domiciliarios

En lo que sigue, se realizan recomendaciones correspondientes para la transición a vehículos eléctricos en la gestión de residuos domiciliarios, integrando elementos claves en función de los análisis que fueron realizados precedentemente.

El análisis de factibilidad técnica y económica realizada permite concluir acerca de la conveniencia de comenzar el proceso de electrificación de las flotas de recolección de residuos en el país, aunque con conclusiones distintas según se refieran a los camiones livianos o pesados.

En el caso de los camiones livianos, es donde el escenario de adopción de esta tecnología luce más auspicioso. Esto es el resultado de existencia de una variedad de marcas y modelos de este tipo de vehículos, de ser una tecnología más estandarizada y en donde las experiencias reales de operación en los departamentos de Canelones y Rocha ofrecen ejemplos concretos de factibilidad de la incorporación de este tipo de vehículos asociados a la recolección de residuos secos en el marco de esquemas de reciclado. La evaluación que los propios involucrados realizan de la incorporación de este tipo de vehículos es muy positiva y la evaluación técnica arroja resultados concluyentes acerca de la factibilidad de su incorporación.

En este tipo de circuitos, el peso de los residuos transportados es menor, por lo cual es el volumen, y no el peso de los residuos lo que define las características de los vehículos a incorporar. Las experiencias locales analizadas se han realizado con camiones estándar, a los cuales se les realizan pequeñas modificaciones (plataforma trasera) que no implican inversiones adicionales relevantes, ni cambios tecnológicos importantes que afecten el funcionamiento estándar del camión. Por otro lado, al poder utilizar camiones de uso general, los requerimientos de inversión son menores y ello es clave para disminuir los costos iniciales.

Los resultados de la evaluación económica no dejan dudas acerca de la conveniencia de avanzar decididamente en la incorporación de estos vehículos, lo cual va de la mano del avance de los esquemas de reciclado. En todos los escenarios analizados, la diferencia de costos en el ciclo de vida es muy favorable a los vehículos eléctricos con relación a los convencionales, y esta conclusión no cambia aun asumiendo supuestos desfavorables en el análisis.

De todo lo anterior se desprende una conclusión muy evidente. En el caso de circuitos de residuos reciclados, el estado actual de la tecnología, así como los análisis de conveniencia económica hace que no se considere necesaria la fase de desarrollar pilotos iniciales con objetivos de validación puesto que las conclusiones alcanzadas son firmes.

Las acciones por implementar deberían centrarse en el diseño de un plan de masificación nacional de este tipo de vehículos, el cual debería asumir proyectos iniciales de baja escala, no con el objetivo de determinar su conveniencia, sino como parte del proceso de aprendizaje necesario que cada institución debe recorrer previo a plantearse la electrificación completa de su flota.

De todos modos, si se entiende necesario que esa experiencia inicial en cada caso se realice en el marco de un seguimiento conjunto entre el Ministerio de Ambiente, o la agencia estatal que lidere este tema y las Intendencias involucradas, de modo de validar las conclusiones alcanzadas a nivel técnico y económico en forma conjunta.

En el caso de los camiones pesados utilizados para la recolección de residuos mezclados en contenedores, no existen experiencias locales y los resultados obtenidos son mucho más ajustados, lo cual lleva a tener una mayor cautela a la hora de las conclusiones.

Se trata de vehículos donde la tecnología se encuentra en proceso de maduración, lo cual lleva a que sean aún escasas las experiencias de operación reales, y a que en ningún caso se encuentren en la etapa de masificación. De este modo, lo que prevalece a nivel internacional y regional son las pruebas piloto con el objetivo de analizar la factibilidad de técnica y económica de este tipo de operaciones.

Los análisis técnicos desarrollados en el marco del presente trabajo dan cuenta de la existencia de una variedad de marcas y modelos, a la vez que de un marcado interés por los representantes de ellas en participar de experiencias iniciales de validación técnica y económica de este tipo de equipamientos. A su vez, de acuerdo con los requerimientos del servicio considerados, se encuentran escenarios teóricos de factibilidad técnica que generarían condiciones convenientes para la incorporación de estos equipamientos. Como ya fue mencionado, todas estas conclusiones no son definitivas y presentan un mayor grado de incertidumbre por el estado de avance tecnológico en este segmento.

En lo que hace a los análisis económicos desarrollados, los mismos no son concluyentes acerca de la conveniencia de la incorporación de vehículos eléctricos en este segmento, siendo que los resultados pueden variar. La evaluación realizada arrojó poca diferencia entre los CTP de trabajar con camiones eléctricos o convencionales. Posibles variaciones en las variables proyectadas, que por tratarse de proyecciones futuras son inciertas, provocan cambios en la conveniencia entre una u otra opción. También varían los resultados según se suponga un horizonte de 8 o 15 años en el análisis o se incorporen o no los efectos de exoneración de impuestos cuando se trata de proyectos promovidos por COMAP, los cuales solo aplican cuando la operación de recolección de residuos es llevada adelante por empresas privadas, pero no, cuando el servicio se realiza directamente por parte de las Intendencias Departamentales.

La variable más relevante sobre la evaluación económica es el costo de los camiones eléctricos. Los precios relevados para vehículos europeos, muy superiores a los que presentan los vehículos chinos en este segmento, desde el punto de vista económico harían claramente inconveniente la reconversión. La negociación con posibles proveedores y la escala que pueda lograrse, podrían mejorar las ofertas obtenidas y los resultados económicos. El hecho de tratarse de un segmento incipiente, con escasas experiencias reales y de baja escala, hace esperar que a medida que su uso se extienda los precios vayan bajando, mejorando paulatinamente su conveniencia económica.

De este modo, y teniendo en cuenta lo expresado precedentemente, el curso de acción sugerido pasa por la realización de experiencias iniciales bajo el formato de pilotos de prueba donde se pueda analizar la factibilidad técnica y económica de la incorporación de este tipo de vehículos en las operaciones de recolección de residuos mezclados y comenzar a generar aprendizaje y capacidades técnicas para etapas posteriores.

Los formatos de diseño que esos pilotos adopten pueden ser de diverso tipo, pero en cualquier caso es posible que deban tener un fuerte apoyo del gobierno nacional bajo la forma de contribución económica total o parcial a la incorporación de este tipo de unidades, además de asistencia técnica y de seguimiento del piloto de modo de que las conclusiones a las cuales se lleguen sean compartibles por todos los participantes.

Para maximizar el resultado de estas experiencias iniciales, se sugiere que los pilotos se realicen en aquellos departamentos que manifiestan un mayor interés y predisposición a trabajar en estos temas. En cuanto a las posibles marcas y representantes locales de las mismas, se destaca el interés en participar, por lo cual es esperable que exista una variedad de propuestas al respecto.

Se entiende que el piloto debe tener un tamaño mínimo que permita concitar el interés y compromiso de los distintos proveedores de vehículos y equipos (bajando además costos de desarrollo), así como permitir una variedad de usos en distintos departamentos y realidades que permitan obtener conclusiones robustas, por lo cual el tamaño mínimo recomendado para el piloto es de 10 unidades.

Resulta clave la generación de un equipo técnico de gestión y seguimiento del piloto que pueda interactuar con los gobiernos departamentales y organismos nacionales involucrados desde el inicio. En este sentido, se podrá encargar de las etapas de planificación del proyecto piloto, de la elaboración de especificaciones técnicas para compra de vehículos y sus equipos, del análisis y estudio técnico de las ofertas, de la conformidad técnica de los vehículos adquiridos, etc. Posteriormente dicho equipo será quien se encargue de sistematizar la información obtenida, así como presentar información del desarrollo del piloto, conclusiones obtenidas y recomendaciones para escalar.

Para finalizar, se presentan una serie de recomendaciones comunes a la incorporación de ambos tipos de vehículos eléctricos, las cuales se desarrollan a continuación:

a) Financiamiento y recursos.

Uno de los factores que aparecen como críticos en todos los casos, es la identificación de las mayores necesidades de financiamiento que los proyectos de electrificación de flota demandan. Es una condición común en cualquier proyecto de electrificación el hecho de que las mayores inversiones, y por lo tanto las necesidades de fondos incrementales ocurren al inicio del proceso mientras que los beneficios ocurren en el correr del tiempo.

En general, las Intendencias presentan situaciones financieras muy ajustadas por lo cual esta situación puede convertirse en un cuello de botella. El diseño de mecanismos de financiamiento se transformará en un aspecto clave que acelerará o ralentizará los procesos de electrificación en aquellos segmentos donde se tenga seguridad acerca de la factibilidad técnica y económica de su adopción.

El gobierno nacional y los departamentales mantienen amplios ámbitos de coordinación. Uno de los mecanismos de relacionamiento más relevantes ocurre bajo la forma de las transferencias del gobierno nacional a los departamentales lo cual se discute en ocasión del armado del Presupuesto Nacional, y en particular, en el marco de los artículos 214 y 298 de la Constitución, los cuales explican más del 80% de los montos transferidos.

El año 2025 será el año de elaboración del presupuesto nacional, en cuyo proceso se negocia el marco de transferencias hacia los gobiernos departamentales durante el quinquenio, por lo cual se presenta una oportunidad para incorporar los temas de electrificación de las flotas de recolección de residuos en el proceso de negociación.

b) Asistencia Técnica, profesionalización y capacitación.

Los procesos de electrificación de flotas presentan oportunidades para la profesionalización de la gestión de recolección de residuos puesto que en general requieren de sistematizar información, realizar informes, analizar datos, planificar servicios con mayor detalle, etc. Esto puede oficiar de movilizador de prácticas de gestión tradicionales y su sustitución por prácticas más modernas y profesionales.

A su vez, los procesos de electrificación requieren de una mayor capacitación para el personal tanto en temas de conducción como de mantenimiento de los nuevos vehículos y el contacto con la infraestructura eléctrica.

Estas oportunidades que los procesos de electrificación generan para avanzar en la profesionalización de la gestión junto con las nuevas necesidades de capacitación que surgen, ameritan incorporar un fuerte componente de asistencia técnica a los gobiernos departamentales que participen de la electrificación de sus flotas de recolección de residuos.

c) Recomendaciones de la operativa del piloto

- Realizar un piloto que opere en circuitos dentro de los límites de los rangos de las baterías

Los circuitos en los que operarán los camiones eléctricos en sustitución de los convencionales deben ser seleccionados de forma muy cuidadosa. Es recomendable previamente realizar relevamientos de las rutas elegidas con camiones convencionales, donde se pueda acompañar a un vehículo en un circuito de recolección completo, tomar una serie de medidas (recorridos en km, tomar tiempos de operación de la compactadora, cantidad de paradas, trayecto hacia descarga, pesos, pendientes, accidentes en el camino, etc.). En función de los datos relevados se podrán seleccionar los mejores candidatos para el piloto.

- No requerir entrar a sitios de disposición final a no ser que estén en buenas condiciones

Para el piloto se debería evitar la descarga en SDF que no estén preparados para camiones eléctricos (superficies firmes y parejas). Las estaciones de transferencia cumplen con este requerimiento, por lo que se podría evaluar solo circuitos hacia estos sitios para el piloto.

- Operación con uno o hasta dos circuitos diarios con la programación de cargas propuestas (evitar punta, carga completa en la madrugada y carga más corta en la tarde)

d) Recomendaciones de datos a monitorear

La ejecución de un plan piloto es una oportunidad ideal para obtener datos propios sobre la operativa de estos vehículos, especialmente para el caso de camiones pesados con cajas compactadoras traseras.

Se recomienda monitorear los siguientes parámetros:

- Energía consumida de batería y distancia recorrida por turno y por día
- Niveles de batería a la salida y llegada de cada turno.
- Energía entregada por el cargador según vehículo para cada carga
- Tiempos de carga de batería en las diferentes modalidades (lenta, rápida) y a diferentes profundidades de carga
- Cantidad de ciclos de carga/descarga
- Capacidad de la batería (se deberá seleccionar al menos una metodología rudimentaria para monitorear este parámetro)
- Pesada del camión en cada descarga
- Velocidades del camión (promedio, máximas)
- Horas de uso de Toma de Fuerza
- Fallas más frecuentes y tiempos de reparación
- Disponibilidad del camión calculada como Tiempo D
- Costos de mantenimiento (preventivo, correctivo, predictivo)
- Costo de la energía
- Uso del freno regenerativo y energía recuperada por frenado
- Energía usada en la compactación y otros usos que no sea el de traslado
- Uso del aire acondicionado

Con estos parámetros se pueden elaborar indicadores como:

- Rendimiento en kWh/km, kWh/ton, kWh/hora de operación
- Rendimientos por circuito y por tonelada de residuos recolectada
- Variación de los rendimientos según chofer, uso del aire acondicionado
- Costo de operación y ahorros operativos y de mantenimiento
- Emisiones evitadas

Que permitirán realizar evaluaciones tecno-económicas con un grado de detalle y confianza mayor al actual, requerido para avanzar hacia una adopción más masiva. Además, se puede extraer información importante para evaluar la experiencia piloto, realizar ajustes para la misma o recolectar insumos y lecciones aprendidas para futuras experiencias.

11 Anexo 1: Relevamiento de las flotas actuales

La recolección de residuos es competencia de cada Intendencia por lo que cada una cuenta con flotas con diferentes tipos de vehículos, con diferentes tipos de recorridos y horarios de trabajo. Los datos sobre las flotas y costos, salvo algún caso muy puntual, no se encuentran disponibles de forma pública, estando esta información disponible solo a través de cada intendencia. Como parte del presente trabajo se buscó información de bibliografía, se realizó una encuesta online y entrevistas con algunos equipos técnicos de las intendencias de las áreas de limpieza, así como con representantes de empresas privadas que brindan estos servicios. También se contó con información provista por el Ministerio de Ambiente.

Fuentes de información

Si bien no hay bibliografía que describa la flota de vehículos de cada intendencia, existen fuentes que fueron de utilidad para el trabajo. Las principales fuentes fueron:

- Estudio Información de Base para el Diseño de un Plan Estratégico de Residuos Sólidos, realizado para OPP por CSI Ingenieros y Estudio Pittamiglio. 2011
- Plan Nacional de Gestión de Residuos – Ministerio de Ambiente. 2021
- Convenios de apoyo económico para mejorar en gestión de residuos. Ministerio de Ambiente e intendencias. 2023 pero varía según la fecha de firma de los convenios según la intendencia.
- Páginas web de las intendencias y notas de prensa

Encuestas, consultas y entrevistas

Mediante estas actividades fue posible relevar datos parciales y muy primarios sobre la operación de la recolección de residuos. Se logró contar con información parcial de 10 intendencias, mediante encuestas, consultas y entrevistas. Mediante estas actividades se contó con información de las intendencias de Canelones, Colonia, Flores, Florida, Maldonado, Montevideo, Paysandú, Rivera, Rocha y Tacuarembó.

En cuanto a empresas privadas, se mantuvieron entrevistas con las empresas TEYMA, CIEMSA y POLITICOR.

Resultados de la información obtenida

Si bien se pudieron obtener algunos datos cuantitativos, estos no abarcan una muestra suficiente para ser utilizados de esta forma. Mediante el trabajo realizado es posible realizar una descripción cualitativa de la flota de recolección de las intendencias en Uruguay.

Descripción general

Tipo de servicios prestados

Los servicios de limpieza que ofrecen las intendencias abarcan la recolección en contenedores domiciliarios, en contenedores públicos, reciclables, residuos especiales, limpieza de playas, barrido, servicios de respuesta rápida y podas. Esta variación de servicios debe realizarse con una flota de vehículos variada que se adapte a cada condición particular. Este trabajo se concentró solamente en los residuos domiciliarios, por lo que se abarcan los servicios de recolección domiciliaria,

contenerizados y reciclables. Esto permite que se limite el alcance para considerar solo camiones, ya que para los demás se requiere de maquinaria variada.

Hay casos de experiencia de vehículos muy livianos como los motocarros. El uso de estos realizado por intendencias es muy limitado. Montevideo ha realizado una experiencia piloto con motocarros eléctricos con resultados no muy favorables. Otras intendencias han adquirido estos equipos para localidades muy pequeñas donde se utilizan para varios usos. Debido a estas razones, la evaluación de motocarros no está incluida en este análisis.

Contenedores

Puede decirse que la mayoría de la población actualmente dispone de sus residuos en contenedores públicos, aunque en varios casos existe un sistema mixto, donde en las principales localidades se utilizan contenedores públicos de 1100 o 770 litros, y en las localidades más chicas se utilizan contenedores domiciliarios. Canelones, por sus características particulares, va al contrario de esta tendencia. Este departamento cuenta con 140.000 contenedores domiciliarios de 120 litros, a su vez, 60.000 de estos cuentan con 2 contenedores para clasificar entre reciclables y no reciclables, y la Intendencia ha entregado alrededor de 40.000 composteras para viviendas. En los centros de Canelones, Pando, Las Piedras y Costa de Oro al sur de la ruta interbalnearia se utilizan los contenedores de 1100 litros.

Otros ejemplos⁴:

- Colonia: más de 3700 contenedores de 1100 litros.
- Flores: 2000 contenedores de 770 litros y 35 contenedores de 1100 litros.
- Florida: Florida y Sarandí Grande están 100% contenerizados. En el resto se utilizan contenedores domiciliarios de 120 litros.
- Lavalleja: Utiliza 900 contenedores de 770 litros.
- Maldonado: aproximadamente 88% se encuentra contenerizado con previsión de llegar al 100%
- Montevideo: gran mayoría contenerizado con contenedores de 3200 litros
- Rivera: 600 contenedores en la ciudad de Rivera, el resto domiciliarios.
- Rocha: 1100 contenedores de 3200 litros.
- San José: 900 contenedores de 2400 lts. Ciudad del Plata 8000 domiciliarios.
- Tacuarembó: 1000 contenedores de 1100 litros.

Disposición final

El Ministerio de Ambiente actualmente trabaja con las intendencias para mejorar la disposición final de los residuos en varios departamentos, lo cual consiste en cerrar vertederos y crear rellenos sanitarios centralizados. En algunos casos pueden abarcar más de un departamento. Se ha avanzado en la clausura de varios vertederos sin controlar y creación de estaciones de transferencia.

- Canelones: cuenta con un vertedero controlado como SDF y una estación de transferencia.
- Colonia: 1 SDF relleno sanitarios y 3 estaciones de transferencia.

⁴ Valores aproximados

- Durazno: cuenta con un vertedero controlado como SDF y vertederos en localidades pequeñas
- Flores: único vertedero en Trinidad
- Florida: SDF con encapsulado en la ciudad de Florida, vertederos en algunas localidades
- Lavalleja: SDF tipo vertedero en Minas más 4 vertederos pequeños
- Maldonado: único SDF tipo relleno sanitario Las Rosas
- Montevideo: único SDF Felipe Cardoso
- Paysandú: 5 SDF tipo vertederos
- Rio Negro: 10 SDF actualmente con vistas a centralizar. Relleno sanitario en Fray Bentos y vertedero controlado en Young, más varios vertederos sin controles.
- Rivera: Centralizado en el SDF vertedero de la ciudad de Rivera, excepto para la localidad de Vichadero lo cual está planificado que también se haga la disposición final en Rivera
- Rocha: Centralizado en SDF relleno sanitario en la ciudad de Rocha
- San José: SDF en ciudad de San José y vertedero en Ciudad del Plata. Estación de transferencia en Libertad.
- Tacuarembó: 6 vertederos sin controles

Servicios tercerizados

La mayor parte de los servicios son de gestión municipal con la excepción de Maldonado. Otros departamentos como Canelones y Rocha han tercerizado parte de la recolección.

- Canelones: gestión municipal en parte y tercerizada en el resto
- Colonia: 100% municipal
- Flores: 100% municipal
- Florida: Los servicios de recolección domiciliaria lo gestiona la intendencia, pero terceriza el servicio de recolección de residuos especiales en camión con caja estándar (cartones, ramas, cajas, podas)
- Maldonado: 100% tercerizado
- Montevideo: 100% realizado por gestión municipal con arrendamiento de vehículos y contenedores
- Paysandú: 100% municipal
- Rivera: 100% municipal
- Rocha: Mixto
- Tacuarembó: 100% municipal

Características de las flotas

Haciendo foco solo en los vehículos dedicados a la recolección de residuos domiciliarios, se diferencian varias opciones usadas actualmente:

Equipos con compactación:

- Camiones de recolección lateral convencional
- Camiones de recolección lateral con caja desmontable tipo roll on - roll off

- Camiones de recolección lateral con posibilidad de levantar en ambos lados del camión
- Camiones de recolección de carga trasera convencional
- Camiones de recolección de carga trasera levanta contenedores

Equipos sin compactación:

- Camiones livianos de caja abierta
- Motocarros

Los principales de estos son los de recolección lateral convencional, utilizados principalmente en Montevideo y Maldonado. En el resto de las intendencias se utilizan comúnmente los de recolección trasera. Los camiones livianos son utilizados en menor medida, pero en todas las intendencias, sin embargo, el uso de estos puede ser para reciclables, podas, servicios especiales, entre otros servicios no dedicados a los residuos domiciliarios.

La información disponible sobre las flotas es limitada como para determinar el tamaño y distribución por tipo de vehículos de la flota nacional. Sin embargo, una estimación gruesa resultaría en una flota aproximada de 350 camiones recolectores (sin tener en cuenta la flota de auxiliares y otros servicios), siendo la mayor parte de estos camiones de recolección trasera.

En el caso de Montevideo, la flota se distribuye de la siguiente forma:

- Carga lateral convencional: 36
- Carga lateral desmontable: 12
- Caja abierta: 22
- Caja trasera: 30

En una reciente licitación, Maldonado adquirió 15 camiones de carga lateral convencional, 3 camiones de carga trasera con compactación (entre otros, estos son los dedicados a los domiciliarios).

Aparte de estos, se conoce la flota en los siguientes casos:

- Canelones: 45
- Flores: 4
- Paysandú: 13
- Rivera: 11
- Tacuarembó: 14

Otro factor que considerar son las capacidades de los camiones. En volumen, las cajas de los recolectores varían entre 8 y 21m³, lo cual implica una capacidad máxima de carga usual de 10 toneladas. Usualmente los operadores optan por no exigir los camiones y trabajar en pesos menores a la capacidad máxima. Esto también depende del volumen y densidad de los residuos. Un estudio realizado con información de varios países de América Latina encontró que los residuos mezclados en Uruguay tienen una densidad promedio de 240kg/m³ [26]. Luego de la compactación pueden alcanzar densidades de 500 kg/m³ o más.

Por ejemplo, en el caso de Rivera los camiones tienen una capacidad de carga recomendada de 6,5 toneladas para preservar su integridad. Algo que también fue comprobado con las empresas privadas para camiones de 8 toneladas.

Recorridos

Los camiones realizan recorridos que pueden variar por día según sea el caso, diferenciando entre recorridos urbanos, suburbanos y aquellos que incluyen el traslado a otras localidades.

Un recorrido urbano puede requerir a partir de 30km por recorrido, mientras que un circuito que incluya más de una localidad recorre hasta 200km por recorrido. El promedio se encuentra aproximadamente en los 75km.

Según sea el caso, cada camión realiza de 1 a 4 recorridos, siendo lo más común que se requiera de 2 recorridos al día, por lo que cada camión trabaja de 6 a 18 horas por día. Existe algún caso en que se realizan 4 recorridos diarios de 5 horas.

La recolección se realiza en la mayoría de los casos de lunes a sábados, con algunos recorridos realizados durante los domingos. En general cada camión trabajará 25 días al mes, y recorrerá en entre 600 y 4000 km mensuales.

En la gran mayoría de los casos, los recorridos deben circular por caminería de balastro o tosca en al menos parte del trayecto, como también deben realizar la descarga en los sitios de disposición final. En general estos sitios no cuentan con calles pavimentadas, por lo que deben ser capaces de recorrer terrenos desparejos y de material suelto.

La flota incluye camiones con una amplia gama de antigüedades, de recién adquiridos hasta camiones de más de 40 años, pero en promedio rondan los 11 años.

12 Anexo 2: Evaluación de rendimientos

El rendimiento energético de los vehículos es un aspecto clave para la evaluación económica de estos vehículos. Se hace referencia al rendimiento como el consumo energético por distancia recorrida o horas de trabajo. Según sea el caso, se expresará en kWh/km, litros/km, km/litros o litros/hora.

En el caso de los vehículos de recolección de residuos los rendimientos podrían también expresarse en toneladas de basura por unidad de energía, aunque este indicador no es de uso común en el ámbito local.

Los valores de rendimiento promedio dependen de múltiples factores, como pueden ser: condiciones de conducción, condiciones de carga, topografía del terreno, tipo de recorrido, condiciones de mantenimiento del camión, consumo de los accesorios (como por ejemplo aire acondicionado), tecnología del motor, etc.

A los efectos de determinar el rendimiento es fundamental analizar los distintos tipos de recorrido. Por ejemplo, un circuito urbano denso recorrerá una distancia corta en comparación con suburbanos, por lo que su indicador de rendimiento en km/litros será menor. A su vez, un circuito

de menor densidad puede alcanzar una velocidad media mayor, y recorrer distancias mayores a menores niveles de carga, por lo que dicho rendimiento en distancia recorrida será mayor al de un circuito urbano.

Los elementos que componen el tipo de recorrido son la frecuencia de paradas, la variación de carga de residuos por parada, la velocidad de tránsito y la distancia al sitio de descarga. En el caso del vehículo eléctrico, la frecuencia de paradas también afecta a la recuperación de energía por frenado regenerativo, lo cual impacta en el rendimiento. Por último, la autonomía requerida del camión impactará en el peso total del vehículo ya que a mayor autonomía mayor será el peso de las baterías necesarias (haciendo menor la capacidad de carga útil), lo cual impacta negativamente en el rendimiento.

Dado que las experiencias locales e internacionales de operación con vehículos eléctricos son escasas, generalmente bajo el control de operadores privados, no se encuentran referencias disponibles fácilmente. Muchas veces la información disponible por parte de los fabricantes para los rendimientos y autonomía de los vehículos eléctricos que ofrecen es demasiado optimista o carece de rigurosidad técnica en su elaboración. Como se mencionó anteriormente, no existe un ciclo de conducción normalizado para medir rendimientos en el caso de camiones de recolección de residuos como si existe por ejemplo para los vehículos livianos (NEDC, WLTP, ECE15, etc.). ²

Por otro lado, la información de los rendimientos de equipos diésel convencionales es más sencilla de encontrar, existiendo extensa información y referencias al respecto.

Con esta información, es posible realizar una estimación inicial sobre el rendimiento de un vehículo eléctrico equivalente, aclarando que los valores pueden ser muy variables en función de las condiciones de manejo, operación, cargas y uso de accesorios como ser aire acondicionado entre otros.

En las siguientes secciones se describen las referencias encontradas, las que incluyen desde experiencias regionales, internacionales y trabajos académicos mediante simulaciones de software.

Referencias sobre rendimientos

Camiones livianos con furgón

Para el caso de camiones livianos con furgón, tomando una referencia de camiones de peso bruto total en el entorno de los 7,2 ton.

A continuación, se resumen los valores encontrados, citando la correspondiente referencia:

Marca/Modelo	Tipo	P.B.T (ton)	Tipo de recorrido	Rendimiento (kWh/km)	Referencia
BYD T6	Real	7.5	Suburbano	0,48	UM- Monitoreo Camiones Eléctricos
BYD T6A	Real	7.5	Urbano	0,52	UM- Monitoreo Camiones Eléctricos
JAC 1063 EV	Catalogo	7.2	N/D	0,49	Fabricante
Farizon H9E-8T	Catalogo	8	N/D	0,71	Fabricante
Fuso Canter 7.5	Catalogo	7.5	N/D	0,59	Fabricante
JAC 1063 EV	Real	7.2	Suburbano	0,50	Calculado en función de datos aportados por Intendencia de Canelones

Tabla 30 - Rendimientos para camiones eléctricos livianos furgón

Camiones recolectores trasero

En la Tabla 31 se muestran las referencias encontradas sobre rendimientos para camiones eléctricos de recolección de residuos con compactación. El indicador rendimiento se calcula como la energía dividida la distancia, por lo que, a mayores valores peor es el rendimiento energético, ya que se requiere más energía para recorrer un kilómetro.

Todos los valores de rendimiento mostrados en el trabajo superan ampliamente el rendimiento energético de vehículos diésel.

Comparando los rendimientos en las mismas unidades, resulta que para los eléctricos varían entre 1 a 2,8 kWh/km, para el caso de un diésel implicaría de 4 a 11 kWh/km, lo cual muestra la ganancia de eficiencia que un vehículo eléctrico puede aportar por la diferencia en el rendimiento de motores eléctricos y baterías contra sistemas a combustión interna. Estos rendimientos se traducen a unidades de combustible como 2,5 km/litro a 0,92 km/litro. Además del ahorro energético, también debe considerarse el ahorro en las emisiones de GEI debido al cambio de fuente de energía y que en el caso de Uruguay es especialmente importante ya que el factor de emisiones de la red eléctrica es muy bajo debido a una alta participación de las energías renovables en la matriz eléctrica.

Las primeras cinco referencias pertenecen al mismo trabajo de simulación [27] para diferentes circuitos de recolección utilizando un camión de 26 toneladas. Los circuitos varían entre 37 y 82 km

y diferentes niveles de densidad urbana. Los rendimientos varían en un rango de 1,2 a 2,8 kWh/km. Las simulaciones incorporan variaciones en el volumen de recolección de los circuitos basados en datos reales para la ciudad de Berlín. El circuito de peor rendimiento es el de mayor densidad urbana y menor distancia, mientras que el mejor es el de mayor distancia en un área residencial que a su vez muestra menores niveles de volumen de recolección.

El promedio de todas las simulaciones resultó en un rendimiento de 1,85 kWh/km para eléctricos y 5,43 kWh/km para diésel. El promedio de la energía recuperada por frenado regenerativo resultó en 25%.

Otros datos interesantes del trabajo es la energía requerida por circuito, la cual varía entre 60 y 111 kWh. Esta información es crítica para dimensionar la capacidad de las baterías. El rendimiento también puede observarse por unidad de residuos recolectados. Estos varían entre 10 y 25 kWh/ton aproximadamente. Otros factores relevantes que considerar en el rendimiento son el consumo de energía de la compactación y del acondicionamiento térmico de la cabina. El trabajo muestra que en promedio el 61% de la energía de la batería se destina a propulsión y el 39% a los otros.

El trabajo de la Universidad de Berlín [28] es otro trabajo de simulación que muestra rendimientos en un rango 1,7 a 2,6 kWh/km para un camión de 26 toneladas y con recorridos entre 41 y 60km.

El trabajo que recoge la experiencia real en Suiza [29] muestra datos para un camión de 26 toneladas de recolección trasera el cual fue diseñado a partir de un chasis diésel Volvo el cual se adaptó para transformar en eléctrico. El camión cuenta con dos baterías las cuales proporcionan una capacidad total de 270 kWh y un peso de poco más de 2 toneladas. En esta experiencia se recolectaron datos de la operación del camión en cuatro circuitos que varían entre 46 y 109 km. Los rendimientos resultaron entre 1,8 y 2,3 kWh/km.

Otras referencias para camiones de 16 toneladas muestran valores teóricos de 1,1 y 1,58 kWh/km.

En las entrevistas sostenidas sobre la experiencia ya mencionada en Brasil se utilizaron camiones BYD de 21 toneladas, para los cuales reportan rendimientos mejores a los simulados, ya que varían entre 0,8 a 1,3 kWh/km aunque se entiende estos valores se deben tomar con cautela tratándose de un camión de 21 toneladas.

En entrevista con Volvo Brasil, para el caso de un camión recolector trasero de 21 toneladas que se está utilizando en Curitiba se informó un rendimiento tras varios meses de pruebas de unos 2 kWh/km.

Nombre	Tipo	Tipo de recorrido	Peso (ton)	Rend. (kWh/km)	Recarga frenado	Fuente	Detalles/comentarios
Schmid et al Esc. 1	Simulación	Alta densidad	26	2 a 2,8		[27]	Distancia: 29 km
Schmid et al Esc.2	Simulación	Área residencial	26	1,2		[27]	Distancia: 82 km
Schmid et al Esc. 3	Simulación	Centro de la ciudad	26	1,7 a 1,85		[27]	Distancia: 53 km
Schmid et al Esc. 4	Simulación	Área mixta recorrida larga	26	1,5 a 1,7		[27]	Distancia: 61 km
Schmid et al Esc. 5	Simulación	Área mixta recorrida corta	26	1,65		[27]	Distancia: 37 km
Entrevista a Volvo 2020	Real	Sin datos	Sin datos	2,03 a 2,64	Sin datos	[27]	Entrevista C. Heyne Volvo Trucks
Estudio TU Berlín	Simulación	Tour 463	26	1,7 a 2,6		[28]	Distancia: 41 km
Estudio TU Berlín	Simulación	Tour 464	26	1,75 a 1,9		[28]	Distancia: 54 km
Estudio TU Berlín	Simulación	Tour 480	26	1,55 a 1,7		[28]	Distancia: 60 km
Desarrollo metódico y evaluación de electrificación...	Simulación			2,23		[27]	
Thoune (Suiza)	Real		26	1,9		[29]	Distancia prom: 62 km
Lausana (Suiza)	Real		26	2,26		[29]	Distancia prom: 46 km
Svedel (Suiza)	Real		26	1,57		[29]	Distancia prom: 109 km
Haldimann (Suiza)	Real		26	1,8		[29]	Distancia prom: 83 km
LE CAMION ÉLECTRIQUE démêlons le vrai du faux	Catálogo		16	1,1		[30]	
Energy ... of Conventional and Battery Electric Refuse Collection Trucks	Simulación		16	1,58	46%	[31]	
Experiencias en Brasil (entrevistas con referentes)	Real	Varios	21	0,8 a 1,3			
Volvo Brasil	Real	Varios	21	2			Entrevista con Volvo Brasil, experiencia en Curitiba

Tabla 31 - Referencias de rendimientos de camiones eléctricos para recolección de residuos

Valores resumen

Se resumen a continuación los valores finalmente utilizados para el análisis económico:

Vehículo	Circuito	Regen.	Rendimiento Eléctrico (kWh/km)
Camión liviano con furgón 7,2 ton	Urbano	25%	0,58
	Suburbano	12%	0,57
Camión recolector trasero 21 ton	Urbano	25%	1,73
	Suburbano	12%	1,70

Tabla 32 - Rendimientos utilizados en el análisis

13 Anexo 3: Supuestos considerados para la evaluación económica

- Precios de la energía según el tarifario de UTE publicado para Mayo 2024. Se utilizaron las tarifas MC1 y TARIFA GENERAL HORA-ESTACIONAL.

Días de la semana y meses del año	Precio de energía \$/kWh			Cargo por potencia contratada \$/kW	Cargo Fijo mensual \$
	Valle	Llano	Punta		
Todos los días de Setiembre, Octubre y Noviembre; y Sábado, Domingo y Feriado del resto del año	1,897	4,170	4,170	140,1	325,8
Lunes a Viernes del resto del año	1,897	4,170	9,481	140,1	325,8

Figura 26 - Tarifa General Estacional utilizada en el análisis

Tarifa	Nivel de tensión kV	Precio de energía \$/kWh			Potencia máxima medida \$/kW				Cargo Fijo mensual \$
		Valle	Llano	Punta	Valle	Llano	Punta	Punta-Llano	
MC1	0,230 - 0,400	2,437	5,363	12,203	-	-	-	370,0	550,0

Figura 27 - Tarifa MC1 utilizada en el análisis

- Tipo de cambio: 39 \$/USD
- Días trabajados en el año: 312
- Tasa de descuento: 8%
- Precio del gasoil: 54,89 \$/litro
- Distancia circuito urbano: 50km
- Distancia circuito suburbano: 100km
- Turnos al día: 2
- Valor residual de la batería: 10%
- Eficiencia de los cargadores: 92%
- Vida útil: 8 años

	Eléctricos			
	Trasero urb	Trasero sub	Liviano urb	Liviano subu
Precio vehículo (USD)	252.971	252.971	57.132	57.132
Capacidad instalada de batería (kWh)	229	229	96,77	96,77
Costo de mantenimiento % eléctrico/diésel	50%	50%	50%	50%
Consumo (kWh/km)	1,73	1,7	0,58	0,57

Tabla 33 - Supuestos sobre camiones eléctricos

	Diesel			
	Trasero urb	Trasero sub	Liviano	Liviano sub
Precio vehículo (USD)	139.320	139.320	35.402	35.402
Costo de mantenimiento en (USD/km)	0,185	0,185	0,08	0,08
Consumo (km/l)	1,8	2,1	4,7	5,3

Tabla 34 - Supuestos sobre camiones diésel

14 Bibliografía

- [1] Mobility Portal España, «Barcelona recibe 73 camiones eléctricos de Renault Trucks para «limpiar» la ciudad,» [En línea]. Available: <https://mobilityportal.es/barcelona-recibe-73-camiones-electricos-de-renault-trucks-para-limpiar-la-ciudad/>.
- [2] Revista Transporte y Turismo, «Nueva York incrementa su flota de eléctricos Mack para recolección de basura,» [En línea]. Available: <https://www.tyt.com.mx/nota/nueva-york-incrementa-su-flota-de-electricos-mack-para-recoleccion-de-basura>.
- [3] Revista Transportes y Turismo, «Mack LR Electric utilizará en EU energía renovable proveniente de residuos,» [En línea]. Available: <https://www.tyt.com.mx/nota/mack-lr-electric-utilizara-en-eu-energia-renovable-proveniente-de-residuos>.
- [4] Central Florida Public Media, «Ocala adding electric garbage trucks to its fleet,» [En línea]. Available: <https://www.wmfe.org/2020-10-14/ocala-adding-electric-garbage-trucks-to-its-fleet>.
- [5] BYD, «BYD TO INTRODUCE FIRST BATTERY-ELECTRIC REFUSE TRUCK TO MARYLAND,» [En línea]. Available: <https://en.byd.com/news/byd-to-introduce-first-battery-electric-refuse-truck-to-maryland/>.
- [6] BYD, «JERSEY CITY TAKES DELIVERY OF FIVE BATTERY ELECTRIC REFUSE TRUCKS,» [En línea]. Available: <https://en.byd.com/news/jersey-city-takes-delivery-of-five-battery-electric-refuse-trucks/>.
- [7] Mercedes Benz Trucks, «EL eECONIC SE ENCARGA DE LA ELIMINACIÓN DE RESIDUOS EN LA SÉPTIMA CIUDAD MÁS GRANDE DE DINAMARCA,» [En línea]. Available: <https://special.mercedes-benz-trucks.com/es/econic/eliminacion-de-residuos/en-esbjerg-la-basura-vive-su-milagro-azul.html>.
- [8] Transporte Carretero, «Producción eléctrica en serie: el Mercedes-Benz eEconic sale de la línea de producción en la planta de Wörth a partir de ahora,» [En línea]. Available: https://www.transportecarretero.com.uy/noticias/energias-alternativas/produccion-electrica-en-serie-el-mercedes-benz-eeconic-sale-de-la-linea-de-produccion-en-la-planta-de-woerth-a-partir-de-ahora.html#google_vignette.
- [9] Interempresas, «Scania entregará al menos 78 camiones eléctricos a la empresa municipal de residuos de Copenhague,» [En línea]. Available: https://www.interempresas.net/Smart_Cities/Articulos/382321-Scania-entregara-al-menos-78-camiones-electricos-empresa-municipal-residuos-Copenhague.html.
- [1] Revista Transportes y Turismo, «El eléctrico Scania 25L opera como grúa compactadora de residuos en Dinamarca,» [En línea]. Available: <https://www.tyt.com.mx/nota/el-electrico-scania-25l-opera-como-grua-compactadora-de-residuos-en-dinamarca>.
- [1] Mercedes Benz trucks, «EL eECONIC TRANSFORMA LA RECOGIDA DE RESIDUOS EN LA PROVINCIA NEERLANDESA DE ZELANDA,» [En línea]. Available: <https://special.mercedes-benz-trucks.com/es/econic/eliminacion-de-residuos/verde-y-naranja-hacia-el-futuro.html>.

[1 todotransporte.com, «Mercedes-Benz Trucks entrega seis eEconic a la ciudad de Frankfurt,» [En línea]. Available: <https://www.todotransporte.com/texto-diario/mostrar/4288225/mercedes-benz-trucks-entrega-seis-eeconic-ciudad-frankfurt>.

[1 S&P Global, «Mobility Research and Analysis,» [En línea]. Available:
3] <https://www.spglobal.com/mobility/en/research-analysis/index.html>.

[1 Cámara de Industrias del Uruguay, «Plan Vale,» [En línea]. Available:
4] <https://www.ciu.com.uy/novedades-ciu/plan-vale/>.

[1 HINICIO para GIZ, «Guía sobre Movilidad Urbana Eléctrica en Uruguay,» 2022.
5]

[1 CINOI, «Transporte Eléctrico de carga: Análisis de los desafíos para su introducción en Uruguay.
6] Calculadora TCO,» Montevideo, 2020.

[1 MIEM, «Balance Energético Nacional - Uruguay,» 2022.
7]

[1 Generadoras de Chile, «Generadoras de Chile,» [En línea]. Available:
8] <https://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile#:~:text=El%20aumento%20de%20la%20generaci%C3%B3n,28%2C0%25%20en%202022.>
[Último acceso: Mayo 2024].

[1 Proyecto MOVÉS, «Estudio comparativo de nivel de ruido generado por el transporte público
9] convencional eléctrico,» 2021.

[2 Energía y Sociedad, «La eficiencia energética del vehículo eléctrico,» [En línea]. Available:
0] <https://www.energiaysociedad.es/manual-de-la-energia/4-2-la-eficiencia-energetica-del-vehiculo-electrico/>.

[2 Proyecto Movés, «Resultados encuesta satisfacción usuarios del TP con unidades eléctricas en
1] AMM,» [En línea]. Available: <https://moves.gub.uy/download/resultados-encuesta-satisfaccion-usuarios-del-tp-con-unidades-electricas-en-amm/>.

[2 Ministerio de Energía y Minería, «Balance Energético Nacional - Balance preliminar 2023,» [En
2] línea]. Available: <https://ben.miem.gub.uy/preliminar.php>.

[2 Balance Energético Nacional, «Factor de emisión de CO2 del SIN,» [En línea]. Available:
3] <https://catalogodatos.gub.uy/dataset/miem-ben-factor-de-emision-de-co2-del-sin>.

[2 Eficiencia Energética Uruguay, «Factores de Conversión,» [En línea]. Available:
4] https://www.eficienciaenergetica.gub.uy/documents/20182/30183/Factores_de_conversi%C3%B3n_y_emisi%C3%B3n_de_CO2.pdf/ffc1001a-746c-490f-a6e3-7016f42f36af.

[2 AMC Mekanocaucho, «VIBRATION ISOLATION OF LITHIUM BATTERIES,» [En línea]. Available:
5] <https://www.mekanocaucho.com/en/news/lithium-batteries-vibration-isolation-en/>.

- [2] LKSur, «Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos Urbanos con Fines Energéticos,» 2013. 6]
- [2] Schmid, F., Taube, J. Rieck y F. Behrendt, «Electrification of Waste Collection Vehicles: 7] Technoeconomic Analysis Based on an Energy Demand Simulation Using Real-Life Operational Data,» *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 7, nº 2, pp. 604-615, Junio 2021.
- [2] ALBA Group, TU Berlin, «Studie netzdienliche Integration hybrider Entsorgungsfahrzeuge (Estudio 8] sobre la integración en red de vehículos híbridos de eliminación de residuos),» Berlin, 2019.
- [2] Oficina Federal de Energía SFOE, Suiza, «Ökologisches und leises 26-TonnenElektro- Wertstoff- 9] Sammelfahrzeug (EWS) (Vehículo recolector de reciclaje eléctrico (EWS) ecológico y silencioso de 26 toneladas.),» Berna, 2019.
- [3] Avere France, Union Française de l'Electricité, «Le camion électrique démêlons le vrai du faux (El 0] camión eléctrico separamos la verdad de la ficción)».
- [3] R. Derakhshan, «Energy Consumption and GHG Emissions Evaluation of Conventional and 1] BatteryElectric Refuse Collection Trucks,» University of Victoria, 2019.

 reifuruguay.org.uy
 REIF Uruguay
 @REIF_Uruguay

REIF Fondo de
innovación en
energías renovables

  **JOINT SDG FUND**

