



Transporte Eléctrico de Carga: Análisis de los desafíos para su introducción en Uruguay

MONITOREO DE CAMIONES ELÉCTRICOS



AUTORES Y AGRADECIMIENTOS

RESPONSABLES TÉCNICO - CIENTÍFICOS

Dr. Ing. Martín Tanco – Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Montevideo

Dr. Ing. Daniel Jurburg – director del Centro de Innovación en Organización Industrial (CINOI)

EQUIPO DE INVESTIGACIÓN

Martín Levy – estudiante avanzado de ingeniería industrial

Sebastián Rossi – estudiante avanzado de ingeniería industrial

María Sol Cavallieri – estudiante avanzado de ingeniería industrial

INFORMACIÓN DEL PROYECTO

FSE_1_2019_1_158846

Fondo Sectorial de Energía (Proyecto) – 2019

“Transporte Eléctrico de Carga: Análisis de los desafíos para su introducción en Uruguay”

Duración: octubre 2020 – abril 2022

APOYOS Y COLABORADORES



Contenido

1. Objetivos y alcance	4
2. Proceso de instalación y de análisis de datos	4
3. Resultados y comparaciones	4
4. Conclusión.....	11

1. Objetivos y alcance

El objetivo principal de este reporte es presentar las limitaciones, los beneficios y el comportamiento de camiones eléctricos en Uruguay.

Con respecto a las limitaciones se busca reducir la incertidumbre y el miedo relacionado a temáticas como la velocidad de carga de la batería, autonomía, curva de aprendizaje de los choferes y vida útil del camión. Los beneficios que se resaltan son ahorros operativos con respecto a los camiones convencionales y ahorros de CO₂. Otros análisis relacionados al comportamiento general del camión estuvieron vinculados a la energía regenerada en el frenado y el estado de carga del camión.

A continuación, se referirá a las empresas de las cuales se relevaron los datos como empresa A y empresa B, para mantener confidencialidad. En el caso de la empresa A se estudió un camión eléctrico a batería BYD T6 (camión A) durante 8 meses y en el caso de la empresa B un BYD T6A (camión B) durante 2,5 meses.

2. Proceso de instalación y de análisis de datos

En los casos de ambas empresas el proceso de instalación tuvo a muchos participantes. Estos fueron: la empresa dueña del camión, el representante de la marca del camión (Sadar), el proveedor del datahub y encargado de su instalación (eMobility) y CINOI. Además, el proveedor del datahub estaba en contacto con la empresa Viriciti, desarrolladora del software utilizado para relevar y visualizar los datos. También se destaca el apoyo de la empresa chilena CCU, que compartió estudios similares de 2019 y 2020, que sirvieron de punto de partida para analizar los monitoreos en Uruguay.

El proceso de instalación del primer datahub comenzó con la empresa A en noviembre 2020 y en abril de 2021 se comenzaron a relevar datos del camión A y a recibirlos en la interfaz Viriciti.

A principios de septiembre se tuvo la oportunidad de comenzar a relevar los datos del camión eléctrico de la empresa B. Gracias a los aprendizajes adquiridos en la instalación anterior, dentro de un mes desde que se planificó instalar el dispositivo de relevamiento ya se pudieron relevar datos de funcionamiento.

3. Resultados y comparaciones

A continuación, se compararán los resultados obtenidos en ambos monitoreos, resaltando los aprendizajes adquiridos.

Una primera comparación a hacer antes de analizar los datos de funcionamiento de los camiones es entre sus caracterizaciones.

Tabla 1: Caracterización de camiones eléctricos monitoreados

	Camión A	Camión B
Modelo	BYD T6	BYD T6A
Peso bruto (kg)	7490	7490
Carga útil (kg)	3400	3390
Capacidad de la batería (kWh)	120	105

Tipo de batería	NCM ¹	LFP ²
Tipo de distribución	Sub-urbana	Urbana

Se destaca que el modelo T6A es más reciente que el T6, conteniendo un tipo de batería LFP, que permite, con capacidades de batería menores, lograr autonomías similares a con una NCM. Por otro lado, cabe aclarar que la distribución tipo sub-urbano indica que se realizan trayectos de carretera (velocidades elevadas, paradas poco seguidas) más frecuentemente.

Los parámetros operativos principales relevados fueron los siguientes:

Tabla 2: Parámetros principales de camiones eléctricos relevados

Parámetro	Valor		Unidad	
	Camión A	Camión B		
Cantidad de días analizados	258	76	Días	
Cantidad de días con el camión en funcionamiento	175	65	Días	
Distancia recorrida total	50155	5614	km	
Distancia recorrida total en el período	24916	5204	km	
Distancia recorrida por día	promedio	144	80	km
	máxima	284	153	km
	mínima	8	53	km
Velocidad promedio	41	32	km/h	
Velocidad máxima	102	94	km/h	
Energía eléctrica cargada por día promedio	70	46	kWh	
Potencia motor máxima	151	173	kW	
Rendimiento diario	promedio	2,08	1,93	km/kWh
	máximo	2,49	2,36	km/kWh
	mínimo	1,12	1,48	km/kWh
Autonomía estimada para un rendimiento diario de tipo	promedio	249	202	km
	máximo	298	248	km
	mínimo	134	155	km
Emisiones de CO ₂ ahorradas	12826	2674	kg CO ₂	
Emisiones de CO ₂ reducidas en árboles plantados equivalente	864	611	árboles	

A continuación se analizarán en mayor profundidad estos parámetros.

Uno de los primeros análisis de datos operativos fue comparar los valores declarados por el fabricante con los valores medidos realmente, para analizar si estas declaraciones que aplican al lugar en donde se hicieron las pruebas, también aplican a Uruguay.

Tabla 3: Comparación de valores declarados por fabricante con valores medidos en camiones eléctricos monitoreados

Parámetro	Camión A		Camión B	
	Valor declarado	Valor medido	Valor declarado	Valor medido
Velocidad máxima (km/h)	≥90	102	≥90	94
Autonomía (km)	240	249	≥200	202
Potencia motor máxima	150	151	150	173

Como se puede observar en todos los casos los valores fueron excedidos, cumpliendo con lo declarado por el proveedor. En el caso del valor de autonomía medido se toma el valor promedio de entre todos los datos relevados.

¹ Batería Níquel - Cobalto - Manganeso

² Batería de litio-ferrofosfato

El siguiente parámetro por analizar es el rendimiento del camión eléctrico. A continuación se puede ver la distribución de rendimientos de ambos camiones.

Figura 1: Distribución de rendimientos en km/kWh del camión A

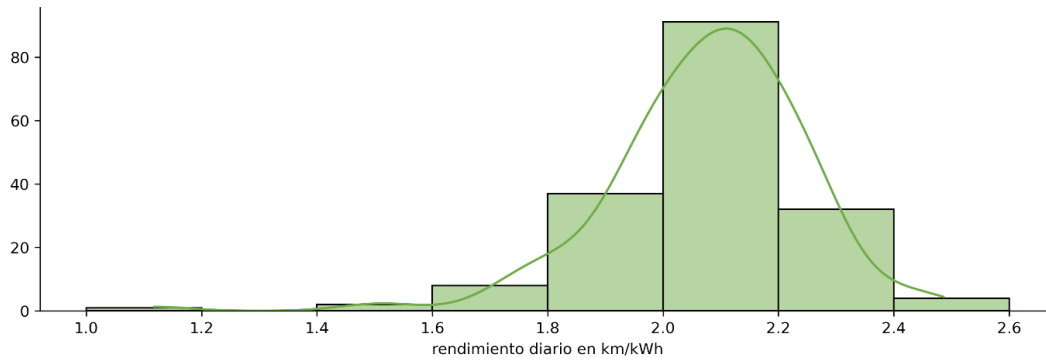
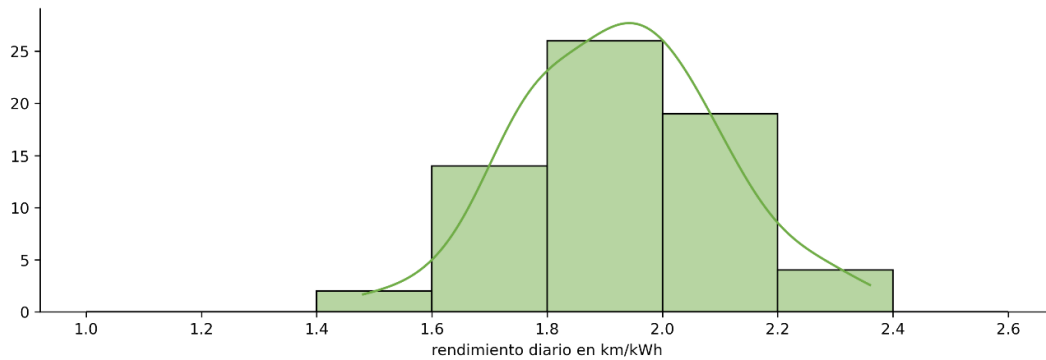


Figura 2: Distribución de rendimientos en km/kWh del camión B

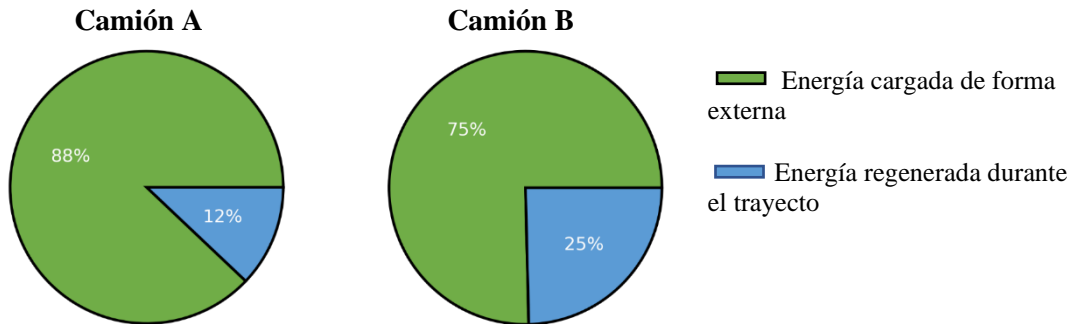


En el caso del camión A el rendimiento promedio es de 2,08 km/kWh, mientras que el camión B es de 1,93 km/kWh. Considerando una tarifa de UTE³ del tipo mediano consumidor 2, horario valle, estos rendimientos podrían expresarse de la siguiente manera: Para el camión A 0,99 \$/km y para el camión B 1,07 \$/km. En el caso de un camión convencional, con un rendimiento de 5 km/L, considerando el costo del gasoil 50-S en 49,94 \$/L, quedaría en 9,98 \$/km. Se puede apreciar que el ahorro de combustible por utilizar un camión eléctrico en este caso es de aproximadamente un 90% del costo de combustible del convencional. Cabe destacar que para lograr los mínimos costos operativos se debe realizar la recarga en horario valle, para lo cual se deberá implementar un sistema que inicie la recarga en un horario definido. Esto puede implicar una solución tecnológica o humana. La opción tecnológica puede tener ciertos desafíos dependiendo de qué tecnologías se estén utilizando.

³ Se utilizó el Pliego Tarifario de UTE vigente desde el 01/01/2021

Un factor importante que influye significativamente en el rendimiento del camión eléctrico es su capacidad de regenerar energía durante los procesos de desaceleración del vehículo. Este efecto es especialmente pronunciado en trayectos urbanos debido a que presentan muchas instancias de frenado.

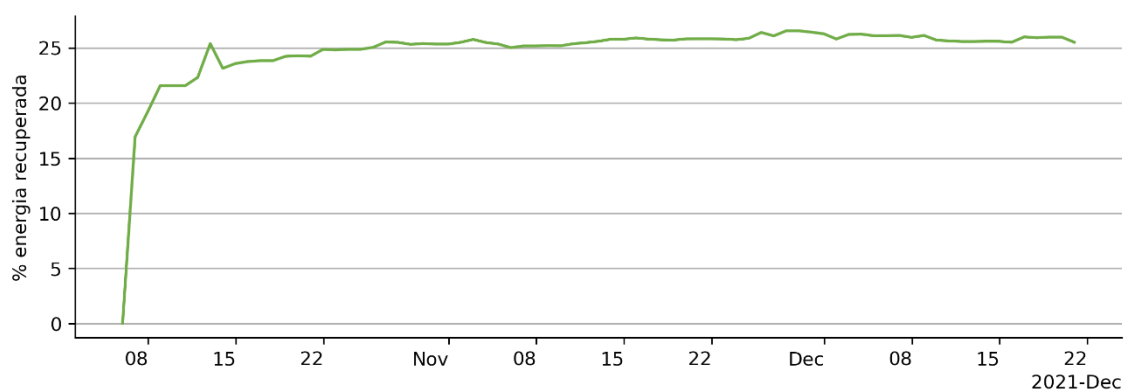
Figura 3: Porcentajes de energía regenerada por los camiones monitoreados



Se puede observar que el camión B, que tiene una distribución urbana tiene un mayor porcentaje de regeneración que el camión A, que hace distribución sub-urbana. Pero igualmente el camión A tiene un rendimiento promedio mayor que el camión B. Por lo tanto, observamos que la regeneración no implica que el rendimiento del camión sea mayor en distribución urbana que en distribución de larga distancia, simplemente significa que la distribución urbana es más eficiente que normalmente.

Además, se pudo aprender de los choferes que el proceso de aprendizaje de aprovechar esta nueva tecnología es rápido, siendo de aproximadamente una semana. Esto se puede observar en la Figura 4, donde se observa el aumento del porcentaje de regeneración, que se dio para una misma ruta circulada. Cabe destacar el máximo local del 12 de octubre, que coincide con un día donde se tuvieron problemas técnicos y el camión tuvo que circular con un 60% de carga. Debido a esta situación el chofer fue en extremo cuidadoso, lo cual se refleja en el porcentaje de energía regenerada.

Figura 4: Evolución del porcentaje de regeneración del camión A



Otra particularidad de utilizar un camión eléctrico es la reducción en emisiones emitidas. Durante su funcionamiento no genera emisiones, sin embargo, la generación de la electricidad utilizada para recargar su batería sí. Sin embargo, gracias al alto porcentaje de energía renovable que se utiliza en Uruguay, el valor de emisiones generadas por el camión eléctrico es muy bajo. Tomando un valor de emisiones de 0,045 kgCO₂/kWh⁴ y con las energías consumidas por los camiones en los períodos en que se monitorearon se llega a que el camión A emitió 2,1 kgCO₂/día y el camión B emitió 1,6 kgCO₂/día.

Comparando estos números con las emisiones generadas por un camión convencional se pueden hallar las emisiones ahorradas por usar un vehículo eléctrico. Para estos cálculos se estima un consumo de camión diésel de 20L/100km y una generación de 2,68 kg CO₂/L_{diésel}. A partir de esto y de los kilómetros recorridos por los camiones se obtiene que un camión convencional hubiese generado 51,8 kgCO₂/día en las condiciones del camión A y 36,8 kgCO₂/día en las condiciones del camión B.

Por lo tanto, los camiones ahorran 49,7 kgCO₂/día y 35,2 kgCO₂/día, respectivamente.

Otra medida para las emisiones ahorradas es comparar estas con las que se hubieran ahorrado por plantar árboles adultos.

Ecuación 1: Cálculo de ahorro de emisiones de CO₂ en árboles equivalentes

$$\text{Árboles equivalentes} = \frac{\frac{\text{emisiones}}{\text{día}} * 365 \text{ días}}{\text{CO}_2 \text{ que absorbe un árbol por año}}$$

Según la Ecuación 1, suponiendo que un árbol adulto puede absorber 21 kg CO₂/año, el ahorro de emisiones mencionado es equivalente a 864 y 611 árboles adultos absorbiendo CO₂ en el período analizado respectivamente. Cuantos más kilómetros se recorren por día mayor es el ahorro generado por no utilizar un camión convencional, lo cual explica por qué el camión A obtiene mayores ahorros que el camión B.

⁴ Dirección Nacional de Energía, valor correspondiente a 2020 y último valor disponible.

A continuación, se analizarán a través de los datos obtenidos, algunos aspectos de baterías de camiones eléctricos. Por un lado, se estudiaron los ciclos de carga de la batería, que indican la cantidad de veces que se puso en funcionamiento la batería. Un ciclo de carga se completa cada vez que se carga y descarga el valor en kWh equivalente a la capacidad de la batería.

Figura 5: Ciclos de carga del camión A

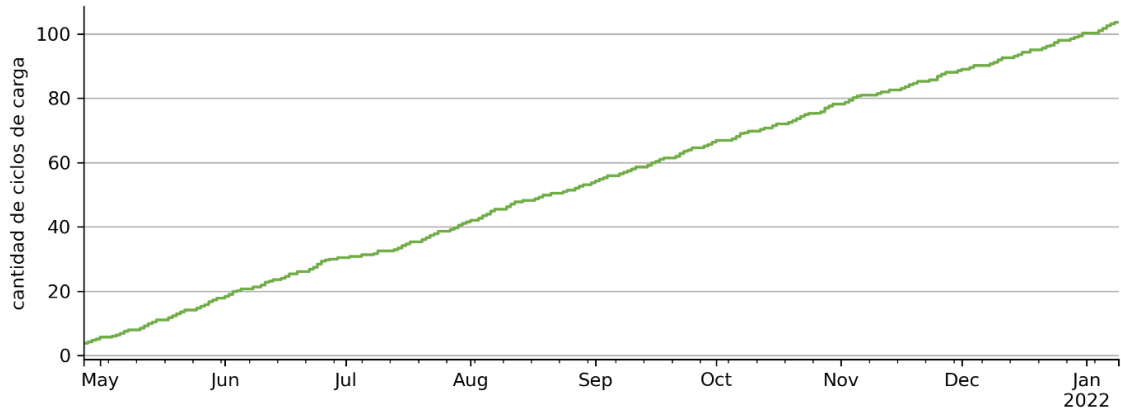
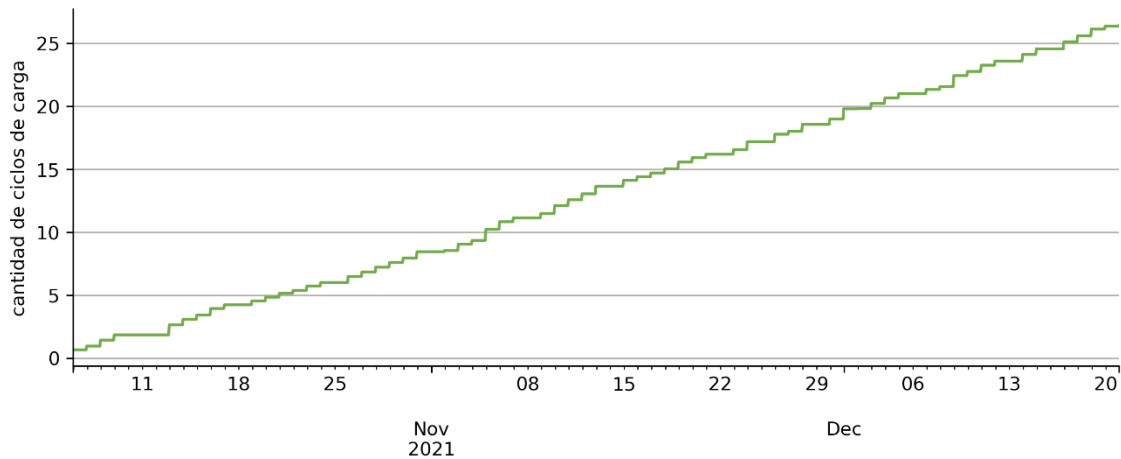


Figura 6: Ciclos de carga del camión B



A partir de los ciclos de carga se puede hacer una primera estimación de la vida útil del camión. Se estima que las baterías utilizadas pueden desarrollar entre 1000 y 2000 ciclos.

Tabla 4: Vida útil estimada para los camiones monitoreados

	Camión A	Camión B
Ciclos completados	100	26
Período de tiempo analizado	258	76
En 10 años ⁵ :	1415 ciclos	1249 ciclos
Tiempo para alcanzar 1000 ciclos:	7 años	8 años
Tiempo para alcanzar 1500 ciclos:	10,6 años	12 años
Tiempo para alcanzar 2000 ciclos:	14,1 años	16 años

⁵ Se consideran años de 365 días.

Un factor que influye en la vida útil del camión es la gestión correcta del estado de carga del camión. También denominado SoC por sus siglas en inglés (State of Charge), indica el porcentaje de carga que contiene la batería momento a momento. Para aumentar la vida útil de la batería se recomienda no descargar la batería por debajo del 20% de su estado de carga regularmente. Se puede observar que en los camiones monitoreados la carga se hace hasta el 100% y que en algunas ocasiones se descarga por debajo de 20% en ambos camiones.

Figura 7: Estado de carga del camión A

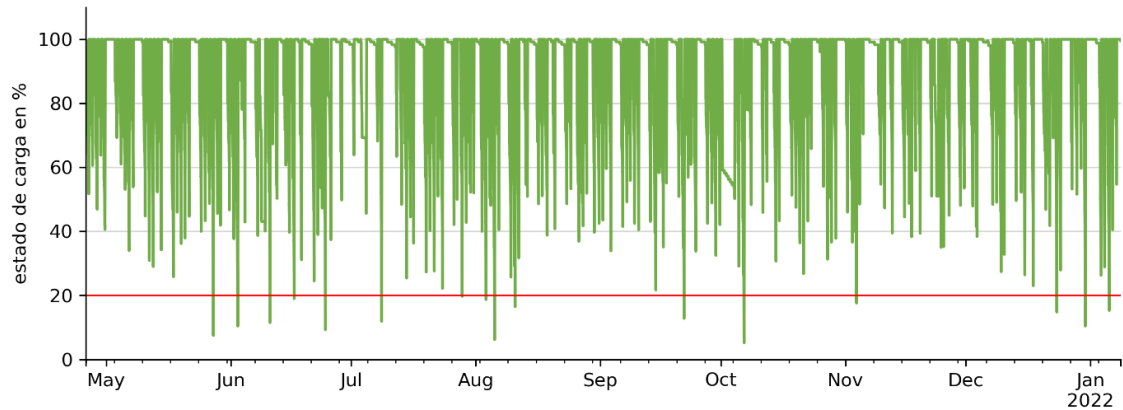
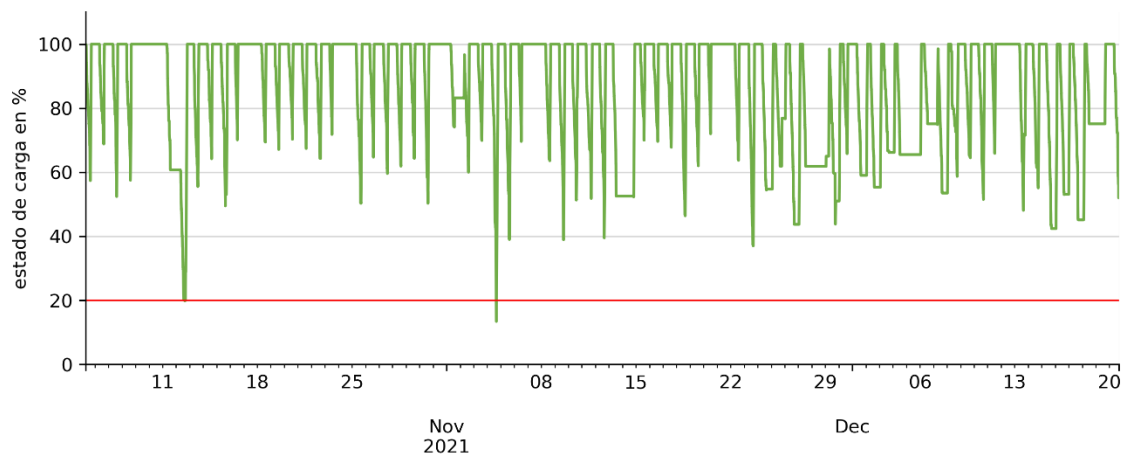


Figura 8: Estado de carga del camión B



Finalmente se analizó el tiempo necesario para recargar la batería de los camiones. Se puede observar que el tiempo de recarga del camión B tiende a ser menor que para el camión A, cuya justificación es multicausal. Por un lado, la batería del camión B es de una menor cantidad de kWh, lo cual, a una misma velocidad de recarga, implicaría que el camión B se recargue más rápido. Por otro lado, la velocidad de carga depende de la potencia del cargador que se utilice, que en el caso de la empresa A es de 45 kW y en la empresa B de 30 kW. Debido a que en la empresa A se tiene una mayor potencia se logran tiempos similares, aunque todavía un poco mayores que en la empresa B. Es de interés destacar que en comparación, un surtidor de combustible entrega energía al tanque de un vehículo a una potencia de 5MW.

Figura 9: Distribución de tiempos de recarga de la batería del camión A

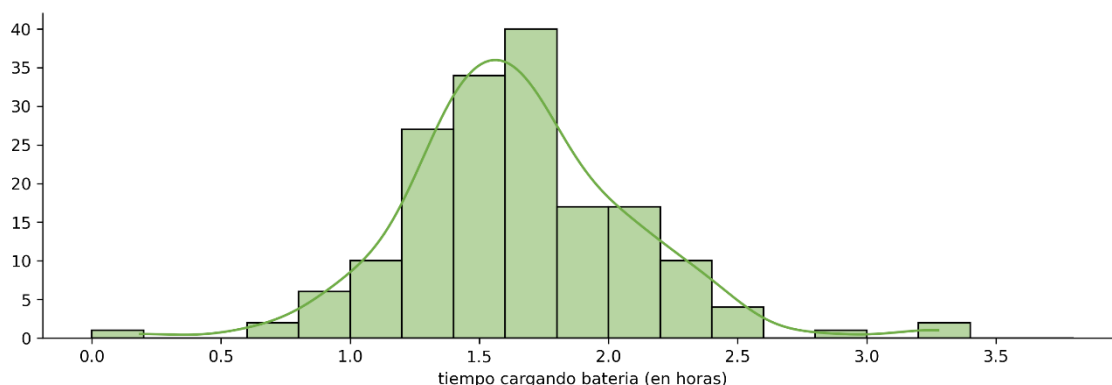
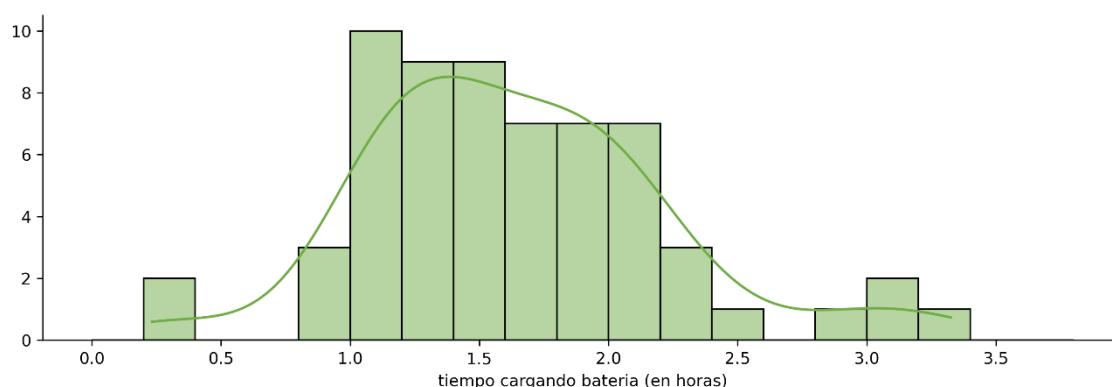


Figura 10: Distribución de tiempos de recarga de la batería del camión B



La posibilidad de cargar al camión en aproximadamente una hora y media aporta gran flexibilidad a la empresa. En algunas ocasiones se observó que, en la mañana, al querer utilizar el camión éste había recargado su batería parcialmente o no lo había hecho. Esto se debió a errores humanos, como olvidarse de iniciar la recarga del camión, problemas técnicos, como que se dé una interrupción inesperada en la carga, pero que también podría darse por un corte de energía. En estas situaciones se identificaron estos problemas en la mañana, se comenzó a recargar nuevamente el camión, que en el tiempo en el cual se prepararon los pedidos para ese día ya se había podido recargar por encima de un 80% de su carga.

4. Conclusión

A través de este estudio se encontró información fundamental que confirma la utilidad de los camiones eléctricos en Uruguay. Se pudo confirmar que el camión cumple con lo indicado por el fabricante y que su vida útil estimada no es una limitante para su uso. Además, se mostró su capacidad de generar ahorros de combustible significativos, de generar ahorros de emisiones de CO₂ y los beneficios de tener un tiempo de recarga de batería reducido. Todo esto tiene que enmarcarse en un buen uso del camión, que incluye aprovechar la capacidad de regeneración de energía y controlar el estado de carga.

En la Tabla 5 se presentan los principales resultados obtenidos durante los períodos analizados.

Tabla 5: Resumen de principales resultados obtenidos de los camiones eléctricos relevados

Parámetro	Valor		Unidad	
	Camión A	Camión B		
Cantidad de días analizados	258	76	Días	
Cantidad de días con el camión en funcionamiento	175	65	Días	
Distancia recorrida total	50.155	5.614	km	
Distancia recorrida total en el período	24.916	5.204	km	
Distancia recorrida por día	promedio	144	80	km
	máxima	284	153	km
	mínima	8	53	km
Velocidad promedio	41	32	km/h	
Velocidad máxima	102	94	km/h	
Energía eléctrica cargada por día promedio	70	46	kWh	
Potencia motor máxima	151	173	kW	
Rendimiento diario	promedio	2,08	1,93	km/kWh
	máximo	2,49	2,36	km/kWh
	mínimo	1,12	1,48	km/kWh
Autonomía estimada para un rendimiento diario de tipo	promedio	249	202	km
	máximo	298	248	km
	mínimo	134	155	km
Costo de energía por kilómetro	0,99	1,07	\$/km	
Porcentaje de energía regenerada promedio	12%	25%	-	
Tiempo estimado hasta alcanzar 1000 ciclos	7	8	Años	
Tiempo estimado hasta alcanzar 2000 ciclos	14,1	16	Años	
Emisiones de CO ₂ ahorradas	12.826	2.674	kg CO ₂	
Emisiones de CO ₂ reducidas en árboles plantados equivalente	864	611	árboles	
Tiempo promedio de recarga de baterías	1:20	1:06	hrs	

Centro de Innovación en Organización Industrial (CINOI)

Facultad de Ingeniería, Universidad de Montevideo. Luis P. Ponce 1307,
11300 Montevideo, Uruguay

cinoi@um.edu.uy

