



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

INFORME ESTADO DEL ARTE DE CAMIONES ELÉCTRICOS EN URUGUAY

Febrero 2022



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



Tabla de contenido

Lista de Tablas.....	5
Lista de Figuras	6
Lista de Abreviaciones y Acrónimos.....	7
1 Introducción.....	9
2 Movilidad eléctrica en el transporte de carga terrestre.....	10
2.1 Avances tecnológicos de la movilidad.....	10
2.2 Importancia de la movilidad eléctrica en el transporte de carga.....	11
2.3 Tendencias de la movilidad eléctrica.....	14
3 Camión eléctrico a batería (BEV)	17
3.1 Funcionamiento	17
3.2 Batería.....	18
3.2.1 Características de las baterías	19
3.2.2 Tiempo de carga de las baterías.....	20
3.2.3 Costo de baterías y tendencias.....	21
3.2.4 Vida útil de las baterías	22
3.2.5 Disposición de baterías	23
3.3 Infraestructura.....	23
3.3.1 Sistemas de carga.....	23
3.3.2 Funcionamiento de los SAVE	24
3.3.3 Clasificación de los SAVE	24
3.3.4 Clasificación de conectores	27
3.3.5 Desafíos de infraestructura para el sector transporte de carga	27
3.3.6 Infraestructura existente en Uruguay.....	28
3.3.7 Infraestructura en América Latina	29
3.4 Operación.....	30
3.4.1 Capacitación de choferes	30
3.4.2 Seguridad	30
3.4.3 Frenado regenerativo	31
3.4.4 Consideraciones sobre la carga de batería.....	32

4	Camión eléctrico con celda de combustible de hidrógeno	34
4.1	Funcionamiento	34
4.2	Obtención y uso del hidrógeno	36
4.3	Infraestructura	37
4.3.1	Distribución	38
4.3.2	Distribución de hidrógeno mezclado con gas natural.....	39
4.3.3	Reutilización de sistemas de tuberías de gas natural.....	40
4.3.4	Almacenamiento	41
4.3.5	Comercio del hidrógeno	43
4.4	Operación.....	47
4.4.1	Recarga de hidrógeno	47
4.4.2	Costo del hidrógeno y rendimiento	48
4.4.3	Seguridad	48
5	Comparación entre tecnologías	50
5.1	Características.....	50
5.2	Impacto ambiental y ciclo de vida	51
5.2.1	Well-to-Wheel diésel.....	52
5.2.2	Well-to-Wheel BEV	53
5.2.3	Well-to-Wheel FCEV	53
6	Contexto uruguayo	54
6.1	Incentivos.....	54
6.1.1	Comparación entre Uruguay, la región y el mundo.....	55
6.2	Avance en hidrógeno	58
6.3	Oferta de camiones eléctricos	59
7	Conclusiones.....	61
	Referencias	63

Lista de Tablas

Tabla 1: Energéticos utilizados	11
Tabla 2: Comparativa entre la situación actual y las principales medidas de mitigación en el sector Transporte establecidas para cumplir los objetivos incondicionales de mitigación de la CDN.	16
Tabla 3: Propiedades de los diferentes tipos de batería ion-litio	19
Tabla 4: Clasificación de las estaciones de carga según su potencia y tipo de corriente	25
Tabla 5: Proveedores de SAVE en Uruguay	26
Tabla 6: Clasificación de conectores de corriente alterna	27
Tabla 7: Infraestructura de carga para vehículos eléctricos en Latinoamérica.....	29
Tabla 8: Proyectos vinculados a la distribución de hidrógeno mezclado con gas natural	40
Tabla 9: Proyectos existentes y futuros relacionados al almacenamiento de hidrógeno	42
Tabla 10: Proyectos de comercialización de hidrógeno	44
Tabla 11: Proyectos de comercialización de hidrógeno (continuación).....	45
Tabla 12: Estado actual y estimaciones de la tecnología del hidrógeno	47
Tabla 13: Comparación entre tecnologías. Elaboración propia.....	50
Tabla 14: Incentivos para la movilidad eléctrica en países de referencial mundial	57

Lista de Figuras

Figura 1: Niveles de maduración de la tecnología	15
Figura 2: Iniciativas de movilidad eléctrica	16
Figura 3: Flujo de energía en un camión eléctrico acelerando	17
Figura 4: Red de carga eléctrica en Uruguay	28
Figura 5: Configuración de camión eléctrico con celda de combustible de hidrógeno..	34
Figura 6: Esquema de distribución de hidrógeno en el vehículo.....	35
Figura 7: Tipos de hidrógeno según la fuente de obtención.....	36
Figura 8: Camión de remolque tubular.....	39
Figura 9: Tanque de almacenamiento de hidrógeno líquido criogénico en el National Renewable Energy Laboratory	41
Figura 10: Costos de transportar hidrógeno para 2030.....	44
Figura 11: Proyectos de comercialización de hidrógeno situados en el mapa mundial .	45
Figura 12: Comparación de eficiencia energética entre BEV y FCEV	51
Figura 13: Well-to-Wheel de las tecnologías estudiadas	52
Figura 14: Incentivos para la movilidad eléctrica en América Latina.....	56
Figura 15: Modelos de camiones eléctricos disponibles en Uruguay	60

Lista de Abreviaciones y acrónimos

A/V	Derecho Arancelario
BEN	Balance Energético Nacional
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i> (vehículos eléctricos a batería)
BSE	Banco de Seguro del Estado
CA	corriente alterna
CC	corriente continua
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i> (captura y almacenamiento de carbono)
CDN	Contribución Determinada a nivel Nacional
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
COP	Conferencia de las Partes
CPL	Camiones de Peso Liviano
CPM	Camiones de Peso Mediano
CPP	Camiones de Peso Pesado
CTP	Costo Total de Propiedad
DERA	New Hampshire State Clean Diesel Program Diesel Emissions Reduction Act Program
FCEV	<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i> (vehículos eléctricos de celdas de combustible)
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GLP	Gas Licuado de Petróleo
GNC	Gas Natural Comprimido
GNL	Gas Natural Licuado
HVIP	Hybrid and Zero-Emission Truck and Bus Voucher Incentive Project
ICCT	Consejo Internacional de Transporte Limpio, <i>International Council on Clean Transportation</i>
ICE	<i>Internal Combustion Engine</i> (vehículos con motor de combustión interna)
IMESI	Impuesto Específico Interno
IPVA	Impuesto sobre la Propiedad del Vehículo Automotor
IRAE	Impuesto a las Rentas de las Actividades Económicas
IVA	Impuesto al Valor Agregado
MIEM	Ministerio de Industria, Energía y Minería
NYCCTP	New York City Clean Trucks Program
NY-TVIP	New York Truck Voucher Incentive Program

OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
OPEP	Organización de Países Exportadores de Petróleo
PEV	<i>Plug-in Electric Vehicle</i> (vehículos eléctricos enchufables)
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i> (vehículo eléctrico híbrido enchufable)
PNCC	Política Nacional de Cambio Climático
SAVE	Sistema de Alimentación de Vehículos Eléctricos
SEAFDP	Southeastern Alternative Fuel Deployment Partnership Project
SMR	<i>Steam Methane Reforming</i> (Reformación de Metano con Vapor)
SOAT	Seguro Obligatorio de Accidente de Tránsito
SoC	estado de carga, <i>State of Charge</i>
TGA	Tasa Global Arancelaria
UTE	Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas
V2G	<i>vehicle to grid</i>
VE	Vehículo Eléctrico
ZEC	<i>Zero-Emission Capable vehicle</i> (vehículos con capacidad de emisión-cero)
ZEV	<i>Zero-Emission Vehicle</i> (vehículos cero-emisiones)

1. Introducción

El objetivo del presente informe es presentarle al lector el estado del arte de los camiones eléctricos, tanto a batería como a hidrógeno, enfocándose en Uruguay.

En primer lugar, se expone en el capítulo 2 acerca de la movilidad eléctrica, su importancia y las tendencias mundiales y nacionales. En esta sección se mencionan todos los energéticos utilizados con fines de transporte, se adentra en la importancia de la movilidad eléctrica en términos de ahorro de emisiones y, finalmente se mencionan las tecnologías emergentes vinculadas a la electromovilidad.

Posteriormente, en los capítulos 3 y 4 se realiza una descripción detallada de camiones eléctricos a batería y camiones eléctrico con celda de combustible de hidrógeno, respectivamente. Para ambas tecnologías, en primer lugar, se expone acerca del funcionamiento técnico de los camiones. Luego, en el caso de los BEV (Battery Electric Vehicles), se detallan los aspectos relacionados a la batería, como puede ser las distintas tecnologías existentes, los tiempos de carga vinculados y la evolución de los precios de estas. En el caso de los FCEV (Fuel Cell Electric Vehicles) se menciona el uso y la obtención del hidrógeno como energético. Finalmente, para ambas tecnologías se detallan aspectos acerca de la infraestructura y operación de los camiones.

Vinculado a lo anterior, en el capítulo 5 se realiza una comparación entre las tecnologías en cuestión. Se analiza desde las características operativas de ambas hasta los impactos ambientales asociadas a cada una de ellas.

El capítulo 6 se centra en el contexto uruguayo en el cual se enmarca el estudio. Se expone acerca de los incentivos desarrollados por el país para promover la movilidad eléctrica, se detallan los avances en cuanto a la producción y utilización de hidrógeno como combustible y finalmente, se lista la oferta de camiones eléctricos existentes en Uruguay.

Por último, en el capítulo 7 se describen las conclusiones del estudio del estado del arte realizado.

2. Movilidad eléctrica en el transporte de carga terrestre

La movilidad eléctrica se refiere a una forma de transportar personas o bienes a través de un vehículo alimentado con electricidad, sin motor de combustión [1]. El vehículo puede ser un auto de pasajeros, autobuses, trenes y camiones y cuentan con un medio para almacenar energía a bordo [2]. En este estudio el enfoque estará dado en la movilidad eléctrica de camiones.

Se consideran dos tecnologías principales de vehículos eléctricos: vehículos eléctricos de batería y vehículos eléctricos con celda de combustible. Por un lado, los BEV funcionan completamente con electricidad y eliminan la necesidad de combustibles fósiles [3]. Por otro lado, los FCEV funcionan con hidrógeno que la pila de combustible convierte en electricidad. Las emisiones pueden ser potencialmente cero carbono dependiendo de la fuente de energía utilizada para obtener el hidrógeno o la energía eléctrica [3].

2.1 Avances tecnológicos de la movilidad

A lo largo de los años ha habido grandes avances en la utilización de diversas tecnologías y combustibles, tanto en el transporte de pasajeros como en el transporte de carga. Enfocándose en el transporte de carga, estas tecnologías pueden clasificarse según las emisiones generadas y el combustible utilizado, clasificación expuesta por Smart Freight Centre en el reporte “Low Emission Fuels and Vehicles for Road Freight” [3]. En función de la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) se tienen tres clases de vehículos: vehículos con motor de combustión interna (internal combustion engine: ICE), vehículos cero emisiones (zero-emission vehicle: ZEV) y los vehículos con capacidad de cero-emisión (zero-emission capable vehicle: ZEC).

Los vehículos con motor de combustión interna se distinguen por tener un energético a bordo que emite emisiones de escape a la atmósfera en el momento del uso, tener una gran cantidad de partes móviles y generar contaminación sonora. En esta clasificación se encuentran los vehículos de encendido positivo (o chispa) que utilizan gasolina, gas licuado de petróleo (GLP) o gas natural en forma comprimida (GNC) o licuada (GNL), y los vehículos con motor de encendido por compresión que utiliza diésel o biodiésel (100% o una mezcla de los dos tipos de combustibles).

Por otro lado, los vehículos cero-emisiones se caracterizan por no emitir gases de escape de la fuente de energía en el punto de uso, tener escasas partes móviles y no emitir sonido. Cabe destacar que el término de cero-emisiones contempla la no emisión de otros contaminantes además de los GEI. Sin embargo, no abarca las emisiones asociadas a la generación y distribución del energético ni a los procesos de fabricación de los vehículos. En esta clasificación se encuentran los BEV y los FCEV.

Por último, los vehículos con capacidad de emisión-cero son aquellos con la capacidad de funcionar por un tiempo como un vehículo de emisión-cero pero que, sin embargo, tiene un energético abordo que emitirá gases de escape a la atmósfera en el punto de uso. Dentro de esta categoría se encuentran el vehículo eléctrico híbrido enchufable (PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle), que utiliza tanto combustibles fósiles como electricidad, dado que tiene un motor a combustión interna y un motor eléctrico, y los vehículos eléctricos de autonomía extendida que, teniendo todas las características de un vehículo eléctrico, incorpora un motor de combustión interna para aumentar el rango de conducción.

Mencionadas las tecnologías existentes, cabe destacar que existen además diversos tipos de combustibles. Se muestran los energéticos en uso y en vías de desarrollo en la Tabla 1 [3]. Además, se detalla una breve descripción.

Tabla 1: Energéticos utilizados

Energético	Descripción
Gasolina	Gasolina convencional obtenida a partir del refinado de petróleo.
Bioetanol	Etanol obtenido de materias primas biogénicas. Puede mezclarse con gasolina convencional.
Diésel	Diésel convencional obtenida a partir del refinado de petróleo.
Biodiésel	Puede ser de primera generación (derivado de cultivos alimenticios o forrajeros como soja) o de segunda generación (derivado de cultivos no alimenticios o materias primas de aceites usados).
Diesel / gas parafínico a líquido	Se refiere a aquellos combustibles en los que el gas natural se convierte en líquido.
Combustibles renovables de origen no biológico	Combustible derivado de la reacción de hidrógeno con dióxido de carbono a temperaturas y presiones elevadas en presencia de un catalizador para formar metano y agua.
Gas natural comprimido	Combustible alternativo al petróleo, compuesto principalmente por gas metano.
Gas natural licuado	Metano que es procesado y almacenado en fase líquida para su transporte.
Biometano	Es el metano derivado de materias primas renovables. Se puede utilizar en un vehículo dedicado a GNC o GNL, o en un vehículo de combustible dual. Se puede mezclar con gas natural de origen fósil en una variedad de porcentajes combinados.
Electricidad	Corriente eléctrica obtenida a partir de la distribución local.
Hidrógeno	Se combina con oxígeno para producir electricidad.

2.2 Importancia de la movilidad eléctrica en el transporte de carga

La importancia de la electrificación del transporte de carga con camiones radica, principalmente, en el crecimiento del sector y los impactos negativos que este crecimiento pueda tener sobre el medioambiente. Esta problemática, y la situación general del cambio climático, preocupa al

mundo hace ya algunos años, y está siendo abordado por muchos agentes desde muchas distintas aristas.

Ya en 1994 se estaban haciendo esfuerzos en combatir el cambio climático, año en el cual entró en vigor la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) [4]. Su objetivo es lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero a un nivel que impida interferencias peligrosas para el ser humano en el sistema climático. Uruguay ratificó la CMNUCC en el mismo año que entró en vigor. Dentro de la CMNUCC, la Conferencia de las Partes (COP) es el órgano decisor supremo, donde están representados todos sus participantes. La COP se reúne anualmente, salvo excepciones como lo fue el año 2020. El 12 de diciembre de 2015, en la COP 21 (reunión anual n°21 de la COP), se alcanzó entre los participantes el Acuerdo de París [5]. Este acuerdo es un tratado internacional sobre el cambio climático jurídicamente vinculante¹. Su objetivo es limitar el calentamiento mundial a muy por debajo de 2, preferiblemente a 1,5 grados centígrados, en comparación con los niveles preindustriales. El acuerdo trabaja en ciclos de cinco años, cada ciclo teniendo medidas climáticas cada vez más ambiciosas. Cada país deberá presentar cada 5 años, comenzando en el 2020, un documento denominado Contribución Determinada a nivel Nacional (CDN) por medio del cual informará a la comunidad internacional las metas y acciones previstas para los siguientes 5 años. En octubre de 2016 Uruguay aprobó el Acuerdo de París a través de la ley N° 19.439 [6]. Dentro de este contexto, en el 2016 se elaboró la Política Nacional de Cambio Climático (PNCC), aprobada por Decreto del Poder Ejecutivo en noviembre de 2017. Ese mismo mes se aprobó la CDN de Uruguay, actuando como herramienta de implementación de la PNCC. Algunos objetivos destacados de la CDN [7], con respecto a la movilidad eléctrica, consistiendo en metas a cumplir para el 2025, son:

1. Reducir primero un 24%, y luego un 5% adicional, la intensidad de las emisiones de CO₂ por unidad de PBI, con respecto al año 1990, en los sectores Energía, incluido el Transporte; y Procesos Industriales. A febrero de 2020 el último valor de medición se encuentra en 27%.
2. Introducir primero 150 vehículos eléctricos utilitarios, y luego 900 adicionales, para el año 2025. En 2019 se alcanzaron un total de 134 vehículos.
3. Instalar la primera ruta eléctrica de América Latina, cubriendo con sistemas de alimentación de vehículos eléctricos las rutas nacionales que unen Colonia-Montevideo-

¹ Un acuerdo jurídicamente vinculante se rige por el derecho, ya sea el derecho internacional (tratados) o el derecho interno (contratos), mientras que para los acuerdos que no son vinculantes (“compromisos políticos”) el derecho no es fuente de fuerza normativa alguna.

Chuy. En 2020 se encontraban instalados 37 puestos de carga² de los 13 planificados, alcanzando y excediendo el valor meta fijado para esta fase.

4. Como segunda fase del plan de instalación de puestos de carga se planifica extender la red de recarga a todo el territorio nacional. En 2020 se encontraban instalados 26 puestos de carga de los 48 planificados. Durante el especial de Portal Movilidad titulado “Movilidad Eléctrica en Uruguay” de febrero de 2021, Fernando Ron, jefe del proyecto de movilidad eléctrica de UTE, afirmó que la red de recarga cuenta a la fecha con 70 cargadores en vía pública, siendo uno de recarga super rápida [8]. La tercera fase consiste en instalar 10 puntos de recarga super rápida.

Además de la CDN, que tiene un alcance de corto plazo, la CMNUCC invita a sus países participantes a elaborar y presentar a la comunidad internacional estrategias de largo plazo contra el cambio climático. Es dentro de este contexto que en agosto de 2020 Uruguay lanza su proceso de elaboración de una Estrategia de Largo Plazo para un Desarrollo Bajo en Emisiones y Resiliente al Clima. El horizonte de la estrategia que se está elaborando es al 2050 [9]. Otros participantes ya presentaron sus estrategias a largo plazo. Por ejemplo, la Unión Europea presentó un plan en marzo de 2020, que apunta a alcanzar la neutralidad climática para 2050. Por su parte China presentó su estrategia en octubre de 2021 y Estados Unidos en noviembre del mismo año [9], [10].

El pasado 31 de octubre de 2021 se realizó en Glasgow la COP 26. Entre los acuerdos derivados de esta conferencia se destaca la declaración conjunta sobre vehículos de cero emisiones. Fue impulsada por el Reino Unido y busca reunir gobiernos, regiones, propietarios de flotas, fabricantes de vehículos y otros para que las ventas de nuevos automóviles y camionetas sean de cero emisiones globalmente a 2040, y no después de 2035 en mercados líderes [11].

Como se puede observar los desafíos ambientales de la actualidad están presentes en la esfera mundial, sin embargo, el sector transporte de carga con camiones no está tan adelantado en propuestas específicas del sector para combatir el cambio climático como otros. Esto hace aún más relevante resaltar la importancia de la movilidad eléctrica en este sector, sumado a que es un gran causante de problemas climáticos.

Tal como se comentó previamente, a nivel mundial, el sector de transporte representa cerca del 64% del consumo mundial de petróleo y el 23% de las emisiones de CO₂ [12].

En América Latina los sectores de servicio mediano y pesado representan cerca del 30% de las emisiones de CO₂ y sólo representan el 5% de los vehículos que circulan [13]. En Uruguay, según la publicación del Balance Energético Nacional (BEN), el sector transporte representa el 62% de las emisiones de los sectores generadores de emisiones CO₂ por consumo de combustible [14].

² Un puesto de carga puede incluir varios cargadores.

Por otro lado es un sector en constante crecimiento, con un aumento del 123% en su volumen de carga mundial entre los años 2000 y 2017 [15]. Tanto en Uruguay como en Latinoamérica, el transporte de carga con camiones es un sector que está creciendo aceleradamente y es el responsable de una fracción mayoritaria del consumo de petróleo mundial y por lo tanto también el responsable de una fracción significativa de las emisiones de CO₂.

Es debido a esta situación, a la capacidad de los vehículos eléctricos de reducir las emisiones, y la poca cantidad de esfuerzos específicos en alcanzar esta capacidad, que la movilidad eléctrica en el transporte de carga con camiones es de gran relevancia hoy en día.

2.3 Tendencias de la movilidad eléctrica

Recientemente, el atractivo de los vehículos eléctricos, tanto para los gobiernos como para los usuarios, hizo que el mercado de vehículos eléctricos creciera en todo el mundo. Los ómnibus fueron el primer y más exitoso caso de electrificación en el mercado de vehículos pesados, pero la creciente demanda de camiones eléctricos está empujando a los fabricantes a ampliar las líneas de productos [13].

En 2020, las matriculaciones de autos eléctricos aumentaron un 41%, mientras que las ventas mundiales de automóviles cayeron un 16%, siendo Europa y China los mercados más grandes [13]. Cuando se trata de vehículos pesados (HDV: Heavy Duty Vehicles), la matriculación ha aumentado un 10% en 2020, alcanzando un stock global de 31.000 vehículos donde China domina el mercado sobre Europa y Estados Unidos [13]. Aunque muchos estudios observan que la electrificación es menos factible en el transporte de carga pesado debido a limitaciones técnicas [16], los fabricantes de camiones como Daimler, MAN, Renault, Scania y Volvo creen que el futuro del transporte será eléctrico [13].

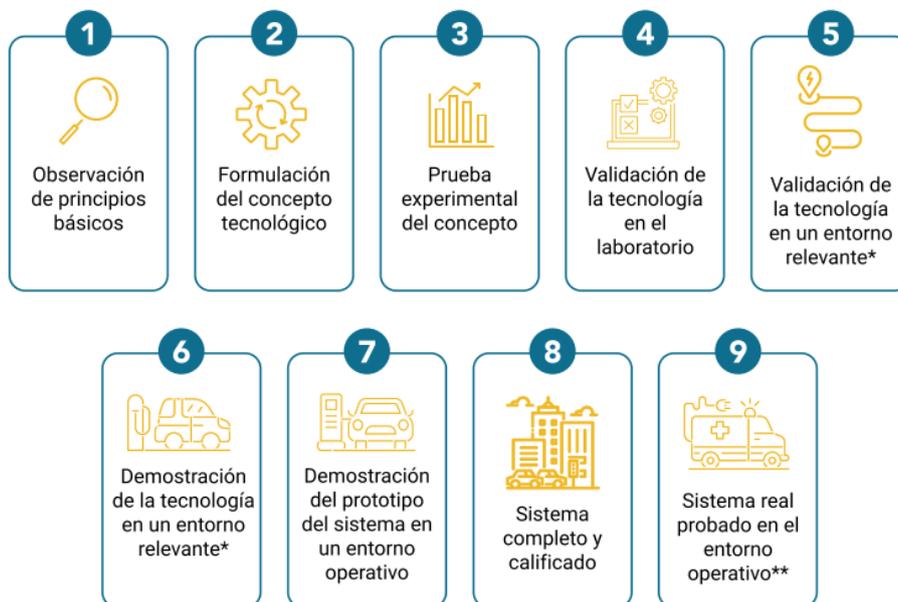
América Latina tiene potencial para aprovechar la tendencia mundial, tanto desde la demanda como desde la oferta de productos y servicios asociados [1]. Por un lado, cuenta con una alta concentración de áreas urbanas, altas tasas de utilización de autobuses y uso de camiones para el transporte de carga y, por otro lado, cuenta con la mayor producción de cobre, las reservas de litio más grandes y, además, cuenta con recursos de energía renovable [1].

En cuanto al estado actual de los vehículos eléctricos a batería en el mundo y en la región, según la Agencia Internacional de Energía (IEA) y los estándares europeos, la tecnología se encuentra en los niveles 8 y 9 de madurez en zonas líderes como China y Europa. En la región de América Latina se tienen niveles 5, 6 y 7, lo cual indica que esta región está en proceso de maduración y mejora continua. Los niveles de maduración se presentan en la Figura 1 [1].

Los vehículos eléctricos a celda de combustible se sitúan con un grado de madurez 6 mayoritariamente en Europa y China, y con un nivel de maduración 3 en América Latina, en base a los avances significativos como el desarrollo de instrumentos de planeación nacional y el

desarrollo de proyectos piloto [1]. China cuenta actualmente con el 94% de buses FCEV y el 99% de camiones FCEV del mundo [13].

Figura 1: Niveles de maduración de la tecnología



Por otro lado, en Uruguay se incentiva la movilidad eléctrica y la incorporación de energéticos alternativos con el objetivo de lograr la soberanía energética, disminuir las emisiones atmosféricas y la contaminación sonora.

Las condiciones del país son favorables para el desarrollo del transporte eléctrico en cuanto a generación e infraestructura, y es por esta razón que se han desarrollado políticas que promueven la comercialización de esta tecnología [17]. En cuanto a la generación de energía eléctrica, en promedio desde 2016 a 2021, el 95% de la generación es a partir de fuentes renovables, destacando la eólica, hidráulica, solar y biomasa [18]. Del total de la energía demandada, el 27% se utiliza para el sector de transporte.

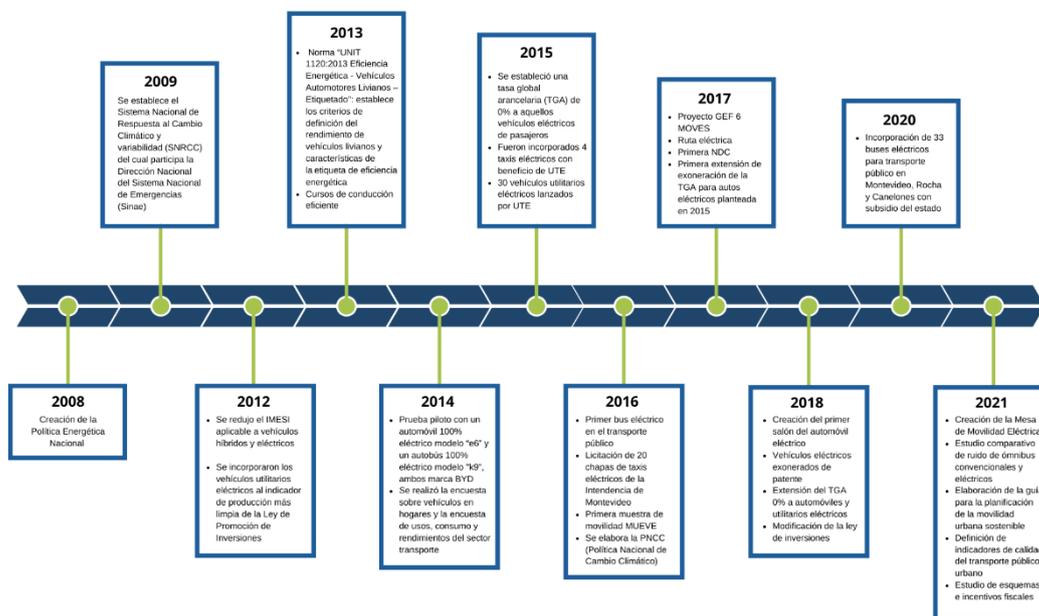
Uruguay fue parte de los países que firmaron el Acuerdo de París y que luego lo ratificaron para afirmar su compromiso con el medio ambiente. En base a esto, el 3 de noviembre de 2017 en Uruguay se aprueba por decreto del poder ejecutivo número 310 la Primera Contribución Determinada (CND) a dicho acuerdo. La Tabla 2 muestra en lo relativo al transporte, una comparativa entre la situación actual y las principales medidas de mitigación en el sector Transporte establecidas para cumplir los objetivos incondicionales de mitigación de la CND [7].

Tabla 2: Comparativa entre la situación actual y las principales medidas de mitigación en el sector Transporte establecidas para cumplir los objetivos incondicionales de mitigación de la CDN.

Sector Transporte		
	CND incondicional	Real
Biocombustibles	5% de mezcla de bioetanol en naftas y 5% de mezcla de biodiesel en gasoil.	10% de mezcla de etanol anhidro en naftas y 7% de biodiesel en gasoil.
Transporte público	15 ómnibus y 150 taxis eléctricos en 2025.	33 ómnibus y 62 taxis eléctricos.
Vehículos utilitarios	150 unidades a 2025.	120 utilitarios de empresas y 92 de UTE.
Ruta eléctrica	Ruta eléctrica que cubra con sistemas de alimentación de vehículos eléctricos las rutas nacionales que unen Colonia-Montevideo-Chuy	Actualmente Uruguay ya cuenta con la ruta eléctrica que une dichos puntos.

A continuación, se muestra en la Figura 2 una línea del tiempo con las iniciativas que han desarrollado promoviendo la movilidad eléctrica [19].

Figura 2: Iniciativas de movilidad eléctrica



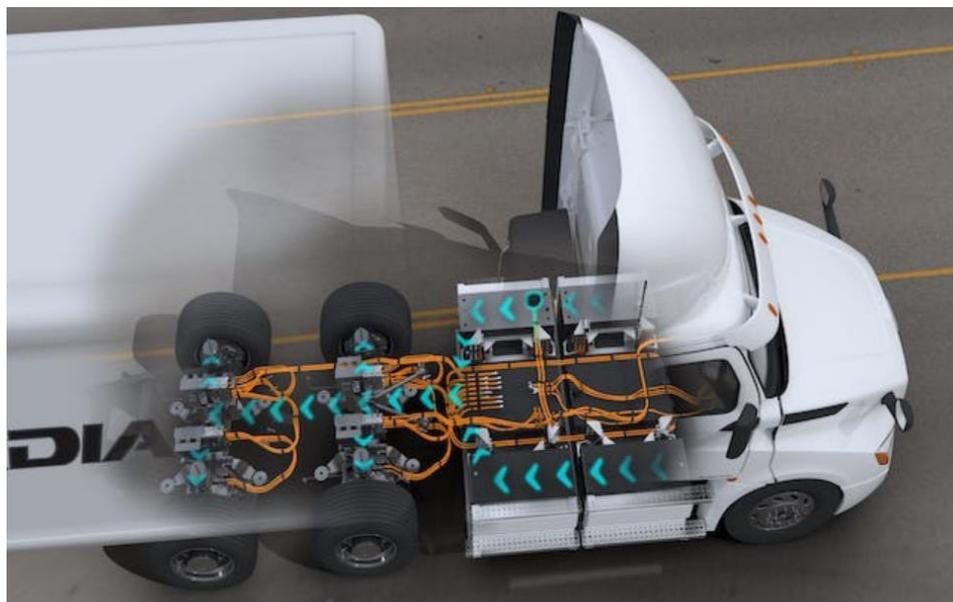
3. Camión eléctrico a batería

Como se mencionó anteriormente, un camión eléctrico es un vehículo con uno o más motores eléctricos que se alimenta mediante baterías (cargadas a través de conexión a la red eléctrica). En los siguientes apartados se profundiza acerca del funcionamiento del camión, de su batería, de la infraestructura existente en Uruguay y en la región, de la infraestructura necesaria para operar el camión y, finalmente, de aspectos relacionados a la operativa, como pueden ser la seguridad y la carga de energía.

3.1 Funcionamiento

A continuación, se detallan los procesos que ocurren cuando se enciende un camión eléctrico [20]. Cuando el conductor gira parcialmente la llave, los iones y electrones de las baterías de alto voltaje están disponibles para alimentar el camión. Una vez que el conductor gira la llave por completo (como si "arrancara" el camión), el sistema de alto voltaje envía energía al tren motriz. Al presionarlo, el acelerador envía una señal de software al inversor, un interruptor que se abre y cierra rápidamente para convertir una señal de corriente continua (CC) en corriente alterna (CA). La energía de CA energiza el motor eléctrico y crea torque. La energía de rotación se alimenta al tren motriz eléctrico, lo que hace que las ruedas giren y el vehículo se acelere. En la Figura 3, extraída del artículo de "Beyond The Batteries: How Electric Trucks Work" de Freightliner [20], se puede ver el flujo de energía cuando está en funcionamiento y no está frenando. Además del frenado estándar, el camión se puede detener mediante la recuperación del freno, también conocido como frenado regenerativo en los vehículos eléctricos de pasajeros. Esto permite que las baterías se recarguen. La energía viaja desde los motores eléctricos hasta el inversor y regresa a las baterías.

Figura 3: Flujo de energía en un camión eléctrico acelerando



Los camiones a batería, a diferencia de los camiones diésel convencionales, tienen muchas baterías en todo el vehículo y tienen un sistema de control para optimizar su carga balanceada y su uso. Las baterías son de dos tipos:

- Baterías de alto voltaje [20], [21]: estas baterías le dan a un camión eléctrico su "marcha". Suelen estar ubicadas entre los rieles del marco y alimentan muchas partes del vehículo. Por ejemplo, estas baterías accionan de uno a tres motores eléctricos (según la configuración), así como un compresor de aire eléctrico, que proporciona presión de aire para los frenos neumáticos y el sistema de suspensión del camión.
- Baterías de bajo voltaje [20]: las baterías de bajo voltaje, generalmente ubicadas debajo del capó de un camión eléctrico, alimentan componentes de bajo voltaje, como los controles en el tablero y varios sistemas integrados.

3.2 Batería

Si bien los principios técnicos para la electrificación de camiones son similares a los disponibles para automóviles, el mayor tamaño y peso de los camiones incrementan las dificultades para que las baterías sustituyan a los combustibles fósiles. Las consideraciones de rendimiento para las baterías se basan en las densidades de energía volumétricas, la potencia específica, la durabilidad y el número de ciclos de descarga que puede soportar una batería antes de perder una importante fracción de la capacidad.

Al conducir en una carretera no congestionada, un camión moderno puede lograr eficiencias del motor a la rueda de no más del 30%, mientras que los camiones eléctricos pueden alcanzar eficiencias del 85% o más [22]. Los motores eléctricos convierten una fracción mucho mayor de la energía química procedente de la batería (entre 85% y 95%), luego de la conversión de corriente continua a corriente alterna. Además, existen alternativas con respecto a la ubicación del motor, colocándolo antes de la transmisión o directamente en las ruedas. Esto puede mejorar aún más la eficiencia, aunque los camiones que trabajan a velocidades de autopista generalmente necesitan una transmisión [22].

La mayoría de las baterías para camiones eléctricos utilizan una de las combinaciones químicas de ion litio disponibles comercialmente. Estas y otras combinaciones están actualmente en el centro de muchos esfuerzos de investigación y están logrando cambios considerables en el rendimiento de la batería. Las principales combinaciones químicas difieren en el cátodo se muestran en la Tabla 3 [23]:

Tabla 3: Propiedades de los diferentes tipos de batería ion-litio

Material del cátodo	Densidad de energía (Wh/kg)	Ciclos de carga y descarga
óxido de litio-cobalto (LCO)	150-200	500-1000
óxido de litio-manganeso (LMO)	100-150	300-700
óxido de litio-níquel-manganeso-cobalto (NCM)	150-220	1000-2000
fosfato de hierro-litio (LiFePO ₄ , LFP)	90-120	1000-2000
óxido de litio-níquel-cobalto-aluminio (LiNCA)	200-260	~500

Las baterías de ion-litio proporcionan altas densidades de energía. En la Tabla 3 se pueden apreciar las propiedades energéticas de cada material junto con la esperanza de vida de los ciclos de carga y descarga. Es a través de estos tipos de baterías, las emisiones de producción, la densidad de energía y la esperanza de vida que se produce un compromiso entre la autonomía del vehículo y la vida útil de la batería.

Mirando hacia el futuro, se espera una gran mejoría en la densidad de energía y en el ciclo de vida de las baterías de ion-litio. Además, existe también una posibilidad de utilizar nuevas combinaciones químicas como el titanato de litio, ion-sodio e ion-aluminio, que podrían tener una densidad de energía y esperanza de vida superiores a las convencionales [23].

3.2.1 Características de las baterías

Las principales características de las baterías son las siguientes:

- Capacidad: La capacidad de la batería representa la cantidad máxima de energía que se puede extraer de la batería bajo ciertas condiciones específicas. Esta unidad puede expresarse en amperios hora (Ah) o en vatios hora (Wh), aunque esta última es la más utilizada por los vehículos eléctricos.
- Estado de carga: Se refiere al nivel de la batería con respecto a su capacidad al 100%.
- Densidad de energía: Es la energía que una batería puede suministrar por unidad de volumen (Wh/L). Obtener la mayor densidad de energía posible es otro aspecto importante en el desarrollo de las baterías, es decir, que con el mismo tamaño y peso una batería es capaz de acumular una mayor cantidad de energía.
- Energía específica: La energía que una batería puede proporcionar por unidad de masa (Wh/kg). Algunos autores también se refieren a esta característica como densidad de energía, y se puede especificar en Wh/L o Wh/kg.
- Ciclos de carga: un ciclo de carga se completa cuando la batería se ha usado o cargado al 100%.
- Esperanza de vida o vida útil: se mide en el número de ciclos de carga que puede contener una batería. El objetivo es obtener baterías que puedan soportar un mayor número de ciclos de carga y descarga.

- Resistencia interna: los componentes de las baterías no son conductores 100% perfectos, lo que significa que ofrecen cierta resistencia a la transmisión de electricidad. Durante el proceso de carga, parte de la energía se disipa en forma de calor (es decir, pérdida térmica). El calor generado por unidad de tiempo es igual a la potencia perdida en la resistencia, por lo que la resistencia interna tendrá un mayor impacto en cargas de alta potencia. Por lo tanto, se perderá más energía durante los procesos de carga rápida en comparación con los lentos. Por esto, es muy importante que las baterías puedan soportar una carga rápida y temperaturas más altas inducidas debido a la resistencia interna. Además, la disminución de esta resistencia puede reducir el tiempo de carga que se requiere, que es uno de los inconvenientes más importantes de este tipo de vehículos en la actualidad.
- Eficacia: es el porcentaje de potencia que ofrece la batería en relación con la energía cargada.

3.2.2 Tiempo de carga de las baterías

Los BEV almacenan energía en baterías, medida en kWh, que luego es utilizada por el motor eléctrico. El factor determinante de la velocidad de carga de las baterías de estos vehículos es la potencia eléctrica suministrada. Es medida en kW, e indica cuanta energía por unidad de tiempo se le está suministrando a la batería. A partir de estos dos datos, y con la siguiente ecuación (Ecuación 1), se puede estimar el tiempo de carga del vehículo:

Ecuación 1: Tiempo de carga de un vehículo eléctrico

$$t_{carga} = \frac{\text{Energía a recargar}}{\text{Potencia suministrada}}$$

Por ejemplo, si se carga un camión BYD T6, que tiene una batería con capacidad para 120 kWh, con una potencia de 96 kW, se estima que se cargará de 0% a 100% en 1,25 horas.

Esta fórmula se cumple aproximadamente entre el 20% y el 90% del estado de carga (State of Charge: SoC), mientras que fuera de estos valores el tiempo es más prolongado.

Relación autonomía – peso de la batería

En un estudio realizado por ICCT (International Council on Clean Transportation) se compara la autonomía con el peso de la batería [24]. Para esto, toma una carga útil de referencia, una carga útil mínima y una carga útil máxima para cada tamaño de batería. En comparación con las cargas útiles de referencia, las cargas útiles bajas mejoran la autonomía de conducción entre un 32% y un 36% para cualquier tamaño de batería [32]. Por el contrario, se observa una reducción menos sustancial del rango de conducción para camiones con carga útiles máximas, que oscila entre el 6% y el 13%.

Efectos de la temperatura en la autonomía

Las necesidades térmicas de los vehículos eléctricos pueden tener un impacto considerable en la autonomía de conducción, especialmente en condiciones meteorológicas extremas [24]. Un estudio realizado por el ICCT [24] compara dos temperaturas extremas (-7°C y 35°C) con una temperatura de clima moderado de 15°C para tamaños de batería desde 300kWh hasta 1000kWh. Los efectos en la autonomía es una consecuencia directa de la dependencia de las propiedades eléctricas de la batería de la temperatura y del consumo de energía de la batería y los sistemas de gestión térmica de la cabina para mantener una temperatura de 20 ° C.

Para tamaños de batería más grandes, el sistema de gestión de la batería (TMS: Thermal Management System) de la batería requiere más energía para mantener la temperatura de las celdas de la batería dentro del rango deseado, lo que resulta en un mayor impacto en el rango de conducción. Las condiciones climáticas cálidas y frías registran un impacto similar en el rango de conducción a pesar de que la diferencia de temperatura entre la temperatura ambiente y la temperatura establecida en la cabina para un escenario de clima frío es mayor. Esto se debe principalmente a la diferencia en el coeficiente de rendimiento del circuito de acondicionamiento térmico de la batería.

3.2.3 Costo de baterías y tendencias

Investigaciones del Laboratorio Nacional de Lawrence Berkeley, la Universidad de California-Los Ángeles y la Universidad de California-Berkeley [25] muestran que los costos en las baterías de camiones han disminuido un 85% en la última década y que estos costos tienden a seguir bajando. Esta tendencia de costos es la razón principal por la que la tecnología eléctrica de baterías tiene actualmente una ventaja sobre la otra opción líder de cero emisiones, los camiones de celda de combustible de hidrógeno, que carecen de una amplia infraestructura de reabastecimiento de combustible y enfrentan otros desafíos para la adopción a gran escala.

Los precios internacionales de los paquetes de baterías son actualmente de 135 USD por kilovatio-hora (kWh), alcanzables para los fabricantes que producen camiones eléctricos a escala [25]. Aun así, actualmente el precio de un camión eléctrico es mayor al precio de un camión diésel, pero los costos iniciales continuarán cayendo a medida que las baterías se vuelvan más económicas. Se espera que los precios promedio de las baterías alcancen los 60 USD/kWh entre 2025 y 2030 [25]. Esta disminución, junto con las mejoras en el diseño de los vehículos y otras políticas habilitadoras, significa que los camiones eléctricos podrían ofrecer hasta un 50% menos de costo total de propiedad por milla en comparación con los camiones diésel convencionales.

3.2.4 Vida útil de las baterías

La depreciación de las baterías eléctricas tiene un impacto significativo en la depreciación física de los camiones eléctricos [26]. La investigación de la confiabilidad de la batería de potencia implica la estimación del estado de carga (SOC) y la estimación del estado de salud (SOH).

El SOH es un índice que se puede calcular según la Ecuación 2:

Ecuación 2: Estado de salud de una batería (SOH)

$$SOH = \frac{R_t}{R_0}$$

Donde R_t es la autonomía estimada en km del viaje número t y R_0 es la autonomía estimada en km cuando el camión fue cargado por primera vez por el usuario [26].

Los principales factores que afectan el SOH son [27]:

- Tiempo
- Temperaturas elevadas
- Operar en niveles altos y bajos de batería
- Cargar el camión con alta intensidad
- Uso: los ciclos de la batería

Según las descripciones de los fabricantes y la literatura existente, una vez que las baterías para automóviles eléctricos alcanzaron el 70-80% de su capacidad nominal, se considera que su función como baterías de primera vida para vehículos eléctricos ha llegado al final. Resultados similares son de esperar para camiones eléctricos. La razón principal es que a partir de este momento se reducirán el kilometraje y la velocidad disponibles para el vehículo. Se estima que esta degradación ocurre después de 5-8 años de uso o equivalente a 160.000km de viaje. Sin embargo, las baterías de vehículos eléctricos retiradas, incluso con menor SOH, podrían reutilizarse en otras aplicaciones, como hogares residenciales o variación de energía en plantas fotovoltaicas a escala de red. Se estima que pueden funcionar otros 7 a 10 años en estas aplicaciones antes de llegar al final de su vida útil y sea necesario reciclarlas [27]. Otra estimación, compartida por Sadar al equipo CINOI, indican que los camiones pueden llegar a completar 2000 ciclos de carga y descarga, lo cual podría implicar mayores kilómetros totales recorridos al final de la vida útil del camión.

Vale la pena mencionar que no todos los propietarios de vehículos eléctricos cambiarán sus baterías a pesar de que el rendimiento de la batería cae por debajo del 70-80% de su capacidad original, ya que es posible que no necesiten la capacidad total para llegar a sus destinos. Sin embargo, eventualmente, todas las baterías de EV deben ser reemplazadas [28].

3.2.5 Disposición de baterías

La promoción de la electromovilidad conlleva el ingreso al país de nuevas tecnologías de baterías, siendo la más utilizada en la actualidad la tecnología de ion de litio. Esto requiere de un marco regulatorio para el adecuado manejo de dichas baterías, una vez que cumplan su vida útil en el vehículo eléctrico.

La adecuación de la normativa de baterías usadas actual (Decreto 373/003), la cual regula el manejo y disposición final de baterías plomo-ácido, es una de las iniciativas que el Proyecto MOVÉS realiza en conjunto con la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA).

En este sentido, ya fue elaborada una propuesta de reglamentación base, la cual se encuentra a la espera de revisiones para ser aprobada.

Uno de los puntos clave es la instrumentación de la responsabilidad extendida del importador/fabricante de la batería, luego de que esta cumplió su vida útil. En caso de no existir capacidades nacionales para una adecuación y segunda vida, o eventual reciclaje y disposición final, el importador/fabricante de la batería deberá asegurarse de que dicha valorización sea realizada en el exterior.

3.3 Infraestructura

3.3.1 Sistemas de carga

El método más popular para cargar VEs (Vehículos Eléctricos) es a través de un cable. Para lograr esto se instala un Sistema de Alimentación de Vehículos Eléctricos (SAVE), también llamado estación de carga, entre la red eléctrica y el vehículo. Su función es gestionar la carga, con énfasis en la seguridad del usuario.

Otra manera de cargar el vehículo es a través de un sistema de transferencia de potencia inalámbrico.

Existen sistemas que cargan el vehículo inalámbricamente cuando está parado y también cuando está en movimiento. Por más que es una tecnología poco avanzada, poco difundida y muy costosa, se está considerando, por ejemplo, para aplicaciones portuarias donde el camión tiene que estar apagado por un tiempo prolongado durante la descarga de mercadería.

Otros métodos alternativos son la recarga por catenarío, donde se suministra electricidad al vehículo desde un cable aéreo fijo, y el cambio de batería (battery swapping), donde en vez de cargar las baterías en el vehículo se las remueve y carga separadamente, cambiando la batería usada por una cargada.

A continuación, se desarrollará acerca de los SAVE, dado que es el método más utilizado por los vehículos de carga eléctricos actualmente.

3.3.2 Funcionamiento de los SAVE

El objetivo del SAVE es gestionar la carga del vehículo eléctrico, a partir de una comunicación entre ambos. Se encarga de proteger al usuario haciendo circular energía solo cuando el cargador está enchufado al vehículo y cuando no hay problemas de aislación. Además, protege al vehículo de tres maneras: detectando el SoC, haciendo pasar una corriente que sea soportada tanto por el cargador como por el vehículo y detectando problemas de hardware. De esta manera se evitan daños a las baterías, cortocircuitos y posibles incendios.

Esto significa que, si el cargador es de 100 kW, pero por el vehículo sólo pueden circular 50 kW, el SAVE hará circular solamente 50 kW. En el caso inverso, en el que el vehículo pueda tomar hasta 100 kW, pero la estación de carga solo puede transmitir 50 kW, el vehículo tomará 50 kW. Integrados a un sistema de carga inteligente los SAVE también pueden informar el SoC al sistema, para optimizar la carga de una flota de camiones eléctricos, por ejemplo. Algunas de las operaciones que se podrían lograr con la carga inteligente son optimizar la secuencia en que se cargan los vehículos, controlar la potencia consumida y cargar en horarios en los cuales la tarifa es menor.

3.3.3 Clasificación de los SAVE

Para comprender la siguiente clasificación se debe comenzar entendiendo cómo se cargan los VEs. La recarga de las baterías ocurre en corriente continua (CC), pero la corriente de la red está en corriente alterna (CA). Esto significa que se tiene que colocar un inversor CA/CC entre la red y el vehículo. La potencia que son capaces de transmitir es dependiente del tamaño de los dispositivos, y por lo tanto también de su costo. Por lo tanto, para lograr cargas rápidas a altas potencias se necesitan inversores grandes y costosos. Una solución a la necesidad de tener un inversor entre la red y la batería es colocar el inversor dentro del vehículo. Sin embargo, debido a limitaciones físicas este no puede ser demasiado grande, lo cual limita la velocidad de carga. Otra solución es colocar el inversor en el SAVE, donde no está limitado en tamaño y puede por lo tanto funcionar a mayores potencias. Es debido a esto que existen estaciones de carga que funcionan a CC y otras en CA.

A continuación, en la Tabla 4, se presenta una clasificación de los modos de carga según su potencia y tipo de corriente, que se puede encontrar en la norma UNIT-IEC 61851-1:2017 [29]. Se agregan valores de potencia entregada y costos de adquisición según una clasificación realizada por el Consejo Internacional de Transporte Limpio (International Council on Clean Transportation, ICCT) [30]. Se complementa la tabla con datos de UTE [35] y la European Commission [36].

Tabla 4: Clasificación de las estaciones de carga según su potencia y tipo de corriente

Nombre	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
				
Descripción	Conexión entre VE y tomacorriente utilizando cable y ficha, no estando equipado con ningún cable piloto adicional o contactos auxiliares.	Conexión entre VE y tomacorriente utilizando equipo de alimentación AC, cable y ficha, con una función piloto de control y un sistema de protección personal contra descargas eléctricas.	Conexión entre VE y SAVE, el cual se encuentra conectado permanentemente a la red de suministro, con una función piloto de control que se extiende desde el SAVE hasta el VE.	Conexión entre VE y SAVE de DC o AC con una función de piloto de control que se extiende desde el SAVE de DC al VE.
Tipo de corriente	CA	CA	CA	CC
Tensión máxima^{3 4}	M: 250 V T: 480 V	M: 250 V T: 480 V	-	
Corriente máxima	16 A	32A	-	
Potencia (kW)⁵		2 – 7	8 – 44	44+
Costo de adquisición (US\$)⁶		250 – 850	3000	18000

Los SAVE que operan en modos 2, 3 y 4 deben proveer las siguientes funciones, destinadas a garantizar la seguridad del usuario: verificar continuamente la continuidad del conductor de protección, verificar que el VE está conectado correctamente al SAVE, activar la fuente de suministro hacia el VE, desactivar la fuente de suministro hacia el VE, interrumpir el suministro de energía si la corriente consumida por el VE excede la máxima corriente permitida.

Según la norma UNIT-IEC 61851-1:2017 [29], el usuario deberá recibir información para el uso del SAVE, proporcionada por el fabricante en el SAVE o en un manual del usuario. Esta información incluye: qué adaptadores están habilitados para su uso (o cuales no), si se permite el uso de adaptadores y si se permite utilizar los prolongadores de cable.

Debido a que los camiones eléctricos a batería necesitan de mucha energía para ser cargados, los SAVE utilizados son los de modo 3 y modo 4. La decisión entre un tipo o el otro depende de cuánto tiempo tenga disponible el vehículo para ser cargado. En operaciones de retorno a base se

³ El primer valor corresponde a corriente monofásica (M), el segundo a trifásica (T).

⁴ Hay modos para los cuales la norma UNIT-IEC 61851-1:2017 no especifica valores de tensión y corriente máximas.

⁵ Potencias ajustadas según datos de la página web de movilidad eléctrica de UTE [31]

⁶ Costos promedio en Alemania, precios 2020

suele realizar la carga con un modo 3 durante la noche, mientras que, en operaciones más intensivas con menos tiempos muertos, se utilizan los cargadores modo 4. Dado que los vehículos personales tienen limitada la potencia que pueden recibir, y por tanto no pueden aprovechar al máximo las ventajas de los de modo 4, estos son utilizados principalmente por VEs pesados, de larga distancia o con baterías grandes.

Otro comentario importante es que los precios mencionados en la Tabla 4 sólo corresponden al costo de adquisición. Los de modo 4 tendrán el mayor costo adicional de entre los tres mencionados debido a su gran impacto en la red eléctrica (costo de operación) y a su mayor tamaño (costo de instalación). Los de modo 3 son los segundos de mayor costo debido a las mismas razones que para los de modo 4.

En la Tabla 5 se muestra una lista de proveedores de SAVE en Uruguay [31].

Tabla 5: Proveedores de SAVE en Uruguay

Empresa	Contacto	Mail
ABB	Ing. Francisco Manfredi, EV Chargers Manager	francisco.manfredi@uy.abb.com
Abriley S.A.	Isaac Attie, Director	info@goelectric.uy
Alternativas Sustentables	Ing. Esteban Lucotti, Director de Proyectos	estebanl@sustentables.com.uy
Conatel S.A.	Ing. Alvaro Sbrocca, Jefe de Ventas	asbrocca@conatel.com.uy
eMobility Solutions	Ing. Alfredo Pintos, Director	alfredo.pintos@emobility-uy.com
Enel X Uruguay	Jorge Cernadas, Desarrollo de Negocios	jorge.cernadas@enel.com
FABLET Y BERTONI S.A	Sr. Guillermo Nebel, Gerente Comercial	g_nebel@fabletybertoni.com
Fescomel S.A.	Lic. Pablo Milán, Director	pablomilan@fescomel.com.uy
KPN Energy Solutions (GLENFIR S.A.)	Iván Regueiro, Director	iregueiro@kpnsafety.com
Raycom	Ing. Alejandro Gigena, Gerente Técnico Energía y Radiocomunicaciones	agigena@raycom.com.uy
Paleson S.A.	Manuel Delucchi, Director	manueldelucchi@paleson.com.uy
PROSEPA – Movilidad Eléctrica	Leonardo Miranda, Ejecutivo de Ventas	leonardomiranda@prosepac.com
PSI	Rafael Borggio, Director	rborggio@psi.com.uy
SeG INGENIERIA	Cr. Sebastián Baccino, Gerente Comercial	baccino@segingenieria.com
SES LATAM SRL	Guillermo Fera, Director	gferia@seslatam.com
Smart Green Uruguay S.A.	Ing. Alvaro Carballo, Gerente	alvaro.sgu@gmail.com
UruSmart	Ing. Martín Rodríguez, Director	info@urusmart.uy
Ventus	Ing. Sebastián Labandera - Gerente de Operaciones Uruguay	movilidad@ventus.global

3.3.4 Clasificación de conectores

Además de haber diferentes tipos de SAVE se tienen diferentes tipos de conectores entre vehículo y SAVE. Estos se presentan en la Tabla 6, elaborada a partir de la norma UNIT 1234:2020 [37] y complementado con un artículo de EnelX [38]. Estos están estandarizados y por lo tanto permiten una clasificación más estricta que en el caso anterior.

Tabla 6: Clasificación de conectores de corriente alterna

CA		Corriente nominal máxima	Tipo de conexión ⁷	Comentarios
SAE J1772 (Tipo 1)		32A	Monofásica	Estándar Norteamericano. Includo en UNIT 1234:2020.
Mennekes (Tipo 2)		70A	Monofásica/ Trifásica	Estándar europeo. Includo en UNIT 1234:2020.

3.3.5 Desafíos de infraestructura para el sector transporte de carga

A continuación, se presentarán los desafíos específicos de la electrificación del sector transporte de carga con respecto a la infraestructura. Por un lado, se prevé un aumento de la potencia que deberá ser capaz de entregar la red de carga. Este desafío es común a la electrificación de todos los vehículos de carga. La diferencia entre el sector analizado y los demás VEs es que mientras que estos últimos generarán una demanda distribuida uniformemente e independiente desde el punto de vista geográfico, el sector transporte de carga por carretera generará altas demandas en puntos específicos, principalmente en las estaciones centralizadas de recarga de baterías de las empresas transportistas. Esto implicará la necesidad de nuevas conexiones y nuevos transformadores. Estas necesidades necesitarán de tiempo para ser ejecutadas, lo cual podría atrasar la electrificación del sector [33]. Además, pueden llegar a ser una carga extra los casos donde se tengan que cargar camiones con baterías grandes en poco tiempo, lo cual requeriría de potencias más elevadas.

Por otra parte, un desafío específico de los VEs pesados es la necesidad de gestionar la carga durante la recarga de toda una flota. Se debe planificar la carga de manera de reducir los costos y tener todos los vehículos cargados a tiempo, lo cual se puede lograr con sistemas “smart charging” y “vehicle to grid” (V2G). “Smart charging” incluye la gestión de carga de la flota en el tiempo,

⁷ Valores máximos admitidos: Monofásica 250 V, Trifásica 480 V

mientras que V2G refiere a la capacidad de enviar energía desde un vehículo a la red, a otros vehículos, o a instalaciones cercanas para reducir la congestión de la red local [34].

Otro desafío refiere a cómo abordar la falta de flexibilidad para elegir cuando recargar el vehículo para cumplir de mejor manera con los compromisos asumidos con los clientes. Debido a estar limitado por sus operaciones, los vehículos podrían tener que realizar sus cargas en horarios punta, a precios elevados [34].

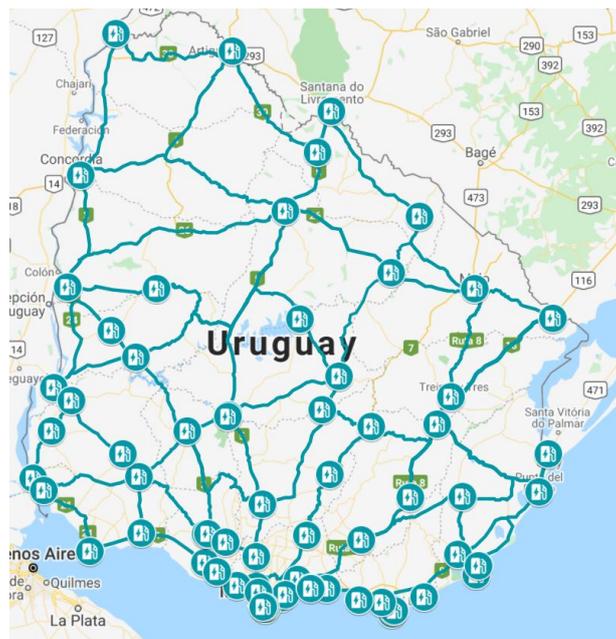
3.3.6 Infraestructura existente en Uruguay

En Uruguay los conectores estándar son los conectores Tipo 2. La norma que define los estándares con respecto a fichas, tomacorrientes, conectores del vehículo y conexiones de entrada del VE en Uruguay es UNIT 1234:2020. Además, se utilizan las normas UNIT-IEC 61851-1:2017, enfocada en tipos de comunicación entre el SAVE y VE, y la norma UNIT-IEC 62196-1:2014, enfocada en tipos de conectores de VE. Sin embargo, dado que en Uruguay se importaron vehículos antes de que el estándar de conectores tomara vigencia, existe una minoría de VEs que tienen otro tipo de conector.

Uruguay fue el primer país latinoamericano en poseer un corredor de carga para VEs. A diciembre de 2021 se dispone de 87 estaciones de carga distribuidos en 48 localidades de todo el país y en 2022 se prevé sumar 35 estaciones, procurando contar con un cargador cada 50km [31]. Para informarse acerca de las ubicaciones de estaciones de carga, el estado de sus cargadores (ocupado/disponible) y la potencia que son capaces de entregar se recomienda la aplicación UTE Mueve.

A continuación, se muestra en la Figura 4 la red de carga eléctrica uruguaya [31]:

Figura 4: Red de carga eléctrica en Uruguay



3.3.7 Infraestructura en América Latina

La infraestructura de carga en América Latina tuvo crecimiento en todos los países respecto a 2020, a pesar del impacto de la crisis económica y sanitaria de la pandemia del COVID19, que impactó directamente en la movilidad y las inversiones asociadas [35]. A continuación, en la Tabla 7, se mencionan los puntos de carga de acceso público con información extraída de Portal Movilidad [35].

Tabla 7: Infraestructura de carga para vehículos eléctricos en Latinoamérica

Argentina	<ul style="list-style-type: none"> • Cuenta con 21 locaciones y 34 conectores de los cuales 25 son tipo 2, cuatro son CCS2⁸ y tres CHAdeMO⁹. • Entre los planes de expansión de infraestructura de acceso público destacan las inversiones en rutas eléctricas de Scame, Vulletic, Chargebox y los cargadores instalados en las estaciones de servicio Axion. • A estos se le suma el trabajo que se está realizando en las provincias de Río Negro y Neuquén.
Brasil	<ul style="list-style-type: none"> • El número total de estaciones de carga públicas y semipúblicas en Brasil saltó de alrededor de 500 puntos en marzo de 2021 a 754 en julio, de los cuales 735 están en operación.
Chile	<ul style="list-style-type: none"> • El país tiene 536 cargadores. 366 son semi rápidos, 169 rápidos y uno ultra rápido. Estos se desglosan en 289 tipo 2 sockets, 96 tipo 2, 58 CCS2 y CHAdeMO y 35 tipo 1. • Los proyectos más resonantes que permiten este despliegue son los de la electrorruta de Enel X y por otro lado los de Copec Voltex.
Colombia	<ul style="list-style-type: none"> • Las 172 locaciones que se mencionan contemplan 392 conectores. De estos, 101 son tipo 2, 92 tipo 1, 76 Schuko y 43 NEMA 5-15. • Los últimos anuncios en ese sentido están marcados por la electrolinera la más grande en un centro comercial de Colombia, el primer punto de carga rápida de Celsia que une el Eje Cafetero y la primera estación de carga en un centro comercial de Pereira junto con su corredor eléctrico.
Costa Rica	<ul style="list-style-type: none"> • Las 258 locaciones albergan 417 conectores que se dividen en 189 tipo 1, 83 NEMA 5-15, 45 CCS1, 45 CHAdeMO. • Vale destacar que recientemente se inauguró la ruta eléctrica que conecta Costa Rica – Panamá que es un reflejo del trabajo en parte del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).
Ecuador	<ul style="list-style-type: none"> • Del total de 36 locaciones, los 44 conectores se dividen en 19 tipo 1, nueve NEMA 5-15, ocho Schuko y siete del tipo 2.
México	<ul style="list-style-type: none"> • Registra 292 locaciones con 684 conectores. Tesla domina el mercado con 279 destination chargers, le siguen 189 tipo 1, 136 Tesla Superchargers.
Perú	<ul style="list-style-type: none"> • Se contabilizaron 30 locaciones con 42 conectores, de los cuales 16 son tipo 2, ocho Schuko, cinco NEMA 5-15 y tres del tipo 1.
República Dominicana	<ul style="list-style-type: none"> • Con un total de 149 locaciones, los 236 conectores son 147 tipo 1, 32 CCS2 y el mismo número en CHAdeMO.

⁸ CCS significa “Combined Charging System” y es utilizado para cargar en CC. Es un cargador del tipo 2 al que se le añade 2 pins de potencia para CC [57].

⁹ CHAdeMO es una abreviatura de CHARge de MOve y es un conector utilizado por fabricantes japoneses. Es un cargador que se ajusta al estándar IEC 62196-3 donde se le conoce como Tipo 4 [57].

3.4 Operación

La forma en la que los vehículos eléctricos consumen energía durante la operación ha sido estudiada en numerosos estudios debido al impacto que tiene tanto en la vida útil de la batería del vehículo como en el costo de operarlo [36].

3.4.1 Capacitación de choferes

Si bien los camiones eléctricos son muy similares a los camiones a diésel convencionales en apariencia, el funcionamiento y la tecnología es muy distinta y amerita que los conductores reciban una capacitación adecuada [37]. Dicha capacitación se recomienda que sea tanto teórica como práctica, a través de recorridos alrededor del camión y prácticas conduciendo. Además, se recomienda capacitación técnica básica enfocada en cómo trabajar con componentes que están a alta tensión. En ocasiones los proveedores ofrecen u obligan a los conductores a tener esta capacitación.

Los conductores pasan por un proceso de aprendizaje relativamente corto (pocas semanas) hasta que logran adaptarse y dominar la tecnología. Aprender a manejar de forma eficiente y eficaz las novedades de la frenada regenerativa, la carga y la autonomía en el uso cotidiano de un vehículo eléctrico es esencial para lograr un comportamiento de conducción y experiencia del usuario optimizado [37].

Algunos consejos para maximizar la autonomía son [37]:

- No acelerar rápidamente porque se utiliza más corriente, lo cual reduce los kWh disponibles y a su vez reduce la autonomía.
- Utilizar el frenado regenerativo cuando sea posible.
- No usar el aire acondicionado cuando no sea necesario dado que, después de la aceleración, es el mayor consumidor de energía.
- Durante la conducción, no mantener el pie en el pedal del freno durante un largo tiempo. Eso puede causar fenómeno de sobrecalentamiento, desgaste y desperdicio de energía eléctrica.

3.4.2 Seguridad

Si bien los vehículos eléctricos tienen ciertas ventajas en materia de seguridad debido a que no llevan a bordo combustibles que son inflamables y tóxicos, es importante tener en cuenta las propiedades físicas y químicas de las baterías y cómo se comportan en distintos escenarios.

Las baterías de litio son las más comunes en los vehículos eléctricos debido a su alta energía y densidad de potencia, combinada con la longevidad de la batería y la autonomía alcanzable. Estas baterías contienen materiales reactivos extremadamente energéticos y electrolitos orgánicos

inflamables. Esto supone una serie de problemas de seguridad que no se encuentra en vehículos convencionales e introduce riesgos que deben comprenderse y gestionarse adecuadamente.

Las baterías contienen los tres elementos necesarios para producir un incendio a través de una reacción química: fuente de calor/ignición, oxígeno y material combustible.

Las baterías tienen un sistema de seguridad que detecta y despeja rápidamente el calor. Si la celda se calienta debido a una carga rápida, una sobrecarga, un cortocircuito o una deformación mecánica, como un impacto o un calentamiento externo, el sistema de iones de litio está diseñado para ventilar el gas para evitar una explosión.

Si la temperatura alcanzara aproximadamente 150°C-200°C, la batería se vuelve inestable y se puede dar lo que se conoce como fuga térmica, un rápido aumento de temperatura interna que desencadena una descomposición continua y otras reacciones electroquímicas exotérmicas asociadas. Las tasas de liberación de energía durante esta reacción aumentan con la temperatura, provocando fugas de electrolito, generación de calor, formación rápida de gas y humo, rotura de celda, incendio, desmontaje rápido y, en el peor de los casos, explosión de gas como resultado de la combustión del electrolito y otros componentes combustibles después de la ruptura del confinamiento de la batería.

A pesar de que existen diversos riesgos vinculados al uso de baterías, también existen muchos riesgos cuando se utiliza un vehículo a combustión interna. Los proveedores de los vehículos eléctricos aseguran que cumplen con los mismos altos estándares de seguridad en choques que otros vehículos y ofrecen los mismos sistemas de seguridad que los modelos diésel. En ocasiones también se agregan escenarios de choque específicos para los vehículos eléctricos para verificar la resistencia a los choques de la instalación de la batería y otros componentes eléctricos [2].

3.4.3 Frenado regenerativo

Cualquier vehículo en movimiento tiene mucha energía cinética y cuando se aplican los frenos para desacelerar, toda esa energía debe ir a alguna parte. En los vehículos convencionales con motor de combustión interna, los frenos convierten la energía cinética, a través de fricción, en calor, que se disipa al ambiente. El frenado regenerativo utiliza al motor del vehículo eléctrico como generador para convertir gran parte de la energía cinética, perdida al desacelerar, en energía almacenada en la batería. Esta energía es utilizada posteriormente cuando se tiene que volver a acelerar.

Es importante aclarar que el frenado regenerativo no es un potenciador de autonomía, es decir, no aumenta la autonomía y no hace que los vehículos sean más eficientes, sino que hace que sean menos ineficientes. La forma más eficiente de conducir sería a velocidad constante y luego nunca tocar el freno dado que al frenar se elimina energía y luego se requiere energía para volver a llegar a la velocidad. De esta forma, la mayor autonomía se obtiene nunca disminuyendo la velocidad,

lo cual no puede ser real ya que no se adapta a las operativas diarias. En estos casos el frenado regenerativo elimina la ineficiencia del frenado y hace que el proceso de frenar tenga menos desperdicios energéticos.

3.4.4 Consideraciones sobre la carga de batería

A partir de una recopilación de manuales de camiones eléctricos y la página web Battery University [38], a continuación, se listan recomendaciones para tener en cuenta al cargar la batería:

- No es recomendable que el estado de carga (SoC: State of Charge) de la batería esté por debajo de 20%.
- La carga de una batería es más eficaz cuando su SoC es bajo. La aceptación de la carga disminuye cuando la batería alcanza un SoC del 70% o más. Una batería completamente cargada ya no puede convertir la energía eléctrica en energía química y la carga debe reducirse para que se apague.
- Cargando una batería más allá del estado de carga completo convierte el exceso de energía en calor y puede resultar en un depósito de materiales no deseados. Además, la sobrecarga prolongada causa daño permanente.
- Antes de iniciar la carga se debe inspeccionar que dentro del puerto de carga y el puerto del conector de carga del vehículo no haya oxidación o corrosión. De haber oxidación o corrosión no se debe cargar dado que se puede ocasionar un cortocircuito o descarga eléctrica
- No se debe desconectar el cargador con manos húmedas dado que puede ocasionar lesiones.
- Cuando la temperatura ambiental es inferior a 0°C, la duración de carga será más larga que el caso normal, la capacidad de carga es relativamente baja.
- Si el vehículo no se utiliza durante un largo tiempo, para extender la vida útil de la batería de energía, se recomienda cargarla y conducir el vehículo una vez cada 3 meses.
- Se debe utilizar el cargador correcto para la química de la batería, la mayoría de los cargadores sirven para sólo un tipo de batería.
- Un cargador de alto voltaje acorta el tiempo de carga, pero existen limitaciones en cuanto a la rapidez con la que se puede cargar una batería. La carga ultrarrápida causa estrés en la batería.
- Se debe observar la temperatura de carga. Las baterías de plomo ácido deben permanecer tibias al tacto; Las baterías de níquel se calentarán hacia el final de la carga, pero deben enfriarse cuando estén "listas". El ion de litio no debe elevarse más de 10°C por encima de la temperatura ambiente cuando alcance la carga completa.

Se ha identificado que las temáticas que más generan desconfianza entre los usuarios de camiones eléctricos son las vinculadas a la confiabilidad y los costos de utilizar baterías.

El costo de cargar las baterías depende de la disponibilidad de tiempo para cargar el camión, la cual está sujeta a las operaciones de cada empresa. Idealmente y debido a los costos de las tarifas eléctricas en Uruguay, se sugiere que la carga sea en la noche, donde las tarifas de energía eléctrica son las mínimas.

Por otro lado, los usuarios normalmente aprenden cómo funciona el camión y se sienten cómodos con la autonomía muy rápidamente [2]. Si la carga de la batería cae a cero mientras se conduce el camión, hay una cierta capacidad de reserva de energía disponible que ayudará al conductor a llegar a un lugar seguro [2].

Finalmente, para determinar si es confiable tener una flota 100% eléctrica se debe hacer un estudio de las distancias recorridas y los kilogramos transportados históricamente, de forma de asegurarse de que las prestaciones de los camiones eléctricos sean suficientes. Los camiones totalmente eléctricos son ideales para transportar mercancías dentro y alrededor de las ciudades en rutas predefinidas que incluyen un regreso a la base de operaciones al final de la jornada laboral para cargarlas [2]. La distribución, la construcción urbana y la recolección de basura (a menudo para las autoridades municipales) son ejemplos de segmentos que han sido los primeros en adoptar camiones eléctricos [2].

4. Camión eléctrico con celda de combustible de hidrógeno

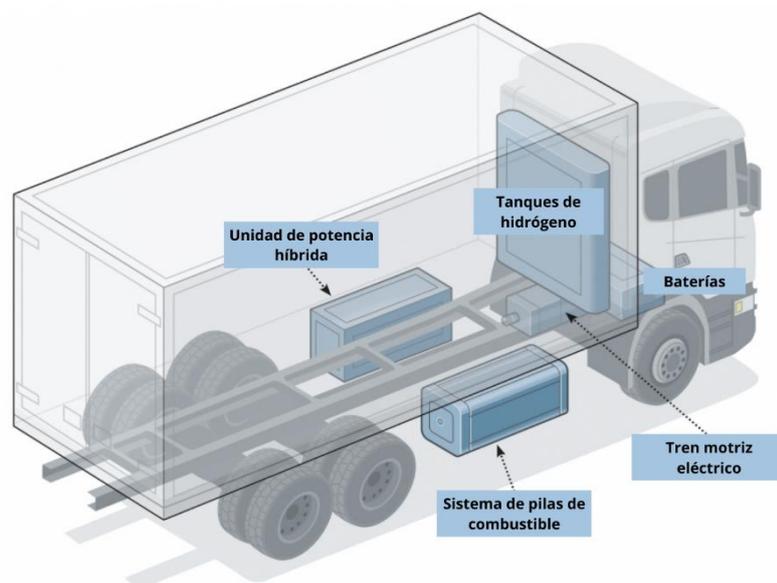
Los vehículos tipo FCEV son vehículos basados en la tecnología de propulsión por hidrógeno. Utilizan la tecnología de las pilas de combustible, lo que significa que durante la reacción del hidrógeno con el oxígeno se produce la energía eléctrica que alimenta el motor. El resultado de este proceso es el agua, que se expulsa al exterior del auto mediante un tubo de escape [39].

4.1 Funcionamiento

En los camiones eléctricos alimentados con hidrógeno el sistema de propulsión es accionado por celdas de combustible a bordo en donde la energía se convierte en electricidad a partir del gas mencionado. Adicionalmente, estos vehículos cuentan con una batería para los momentos en que se necesita energía adicional y cuando el vehículo necesita recuperar energía eléctrica de la energía de los frenos [40].

En la Figura 5 se muestra una posible configuración de un FCEV, traducido de un artículo de Scania [46].

Figura 5: Configuración de camión eléctrico con celda de combustible de hidrógeno



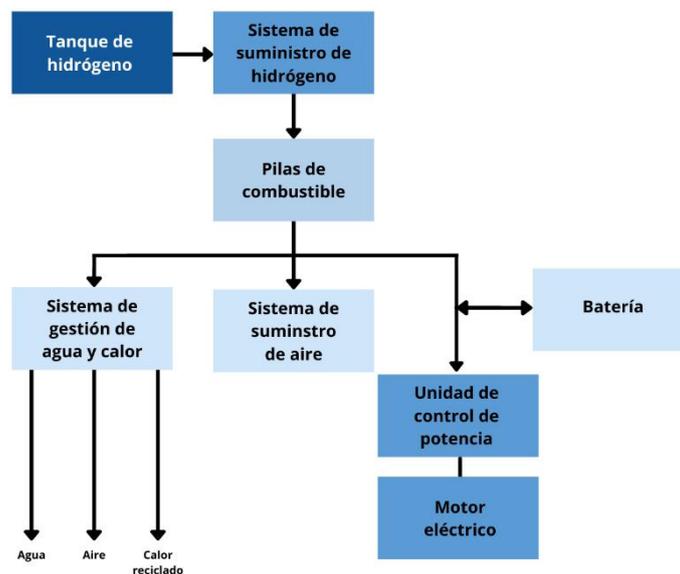
A continuación, se explica el fenómeno que ocurre en la celda de combustible a partir de la cual se obtiene energía para accionar al motor eléctrico [41]:

- Paso 1: las moléculas de hidrógeno, que se encuentran almacenadas como gas comprimido en los tanques a bordo del camión, primero ingresan al electrodo de hidrógeno (llamado ánodo) de la celda de combustible.

- Paso 2: las moléculas de hidrógeno luego reaccionan con el catalizador que recubre el ánodo, liberando electrones para formar un ion de hidrógeno cargado positivamente.
- Paso 3: los iones cruzan el electrolito y llegan al oxígeno en el segundo electrodo (llamado cátodo).
- Paso 4: los electrones que no pueden pasar el electrolito fluyen hacia un circuito eléctrico, generando la energía del sistema de pila de combustible.
- Paso 5: en el cátodo, el catalizador hace que los iones y electrones de hidrógeno se unan con el oxígeno del aire para formar vapor de agua, que es el único subproducto del proceso. El vapor de agua se descarga a través del tubo de escape junto con el nitrógeno que ingresó a la pila de combustible en el aire.

Aunque secundarios, la celda de combustible también alimenta un sistema de suministro de aire, que se compone de un filtro de aire, un compresor de aire y humidificadores que proporcionan oxígeno a la celda. Además se tiene un sistema de gestión del agua y del calor, teniendo circuitos separados de agua y refrigerante usados para eliminar el calor residual y los productos de la reacción (agua). Por otro lado, a través de este sistema se puede transportar el calor a la cabina del vehículo y mejorar la eficiencia. En la Figura 6 se puede ver un esquema de lo explicado anteriormente, traducido de un informe de Deloitte China y Ballard [41].

Figura 6: Esquema de distribución de hidrógeno en el vehículo



Las pilas de combustible suelen clasificarse según el tipo de electrolito utilizado. Los tipos típicos de electrolitos de celdas de combustible incluyen [41]:

- La membrana de intercambio de protones ("PEM")

- La celda de combustible alcalina ("AFC")
- La celda de combustible de ácido fosfórico ("PAFC")
- Las celdas de combustible de óxido sólido ("SOFC")
- El carbonato fundido pila de combustible ("MCFC")

De estos, el PEM es el tipo más comercializado en la actualidad, debido a su baja temperatura de funcionamiento (50-100 °C), su corto tiempo de inicio y la facilidad de uso de su oxidante (aire atmosférico).

4.2 Obtención y uso del hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más abundante en el universo, pero no se forma naturalmente por sí solo. Se puede encontrar en agua, combustibles fósiles o biomasa. Para extraer el hidrógeno, se pueden utilizar procesos como, por ejemplo, la electrólisis o el reformado de metano con vapor [42].

Como se mencionó anteriormente, el hidrógeno se puede obtener de distintas fuentes. Si bien no existe una nomenclatura oficial, en la industria se suele distinguir al hidrógeno según su origen con colores. La Figura 7, traducida de un informe de NACFE, muestra la nomenclatura utilizada [43].

Figura 7: Tipos de hidrógeno según la fuente de obtención



Como se mencionó anteriormente, una forma de obtención del hidrógeno es a partir de la electrólisis. Este es el proceso de obtención que interesa en Uruguay. Consiste en la división de

la molécula de agua (H₂O) en dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno mediante la adición de energía eléctrica. En específico, es de interés para la descarbonización del transporte que la energía eléctrica utilizada sea renovable. El oxígeno que se produce se libera a la atmósfera y el hidrógeno se almacena en un tanque. Este hidrógeno se puede utilizar para llenar una celda de combustible de un vehículo. Cuando el vehículo se encuentra en funcionamiento, su celda de combustible toma el hidrógeno almacenado y oxígeno de la atmósfera y produce energía eléctrica para alimentar al motor eléctrico, agua y calor [42]. La producción de hidrógeno mediante electrólisis requiere alrededor de 9 litros de agua por kg de hidrógeno, por lo que debe considerarse una fuente estable de este recurso, que Uruguay, a diferencia de otros países de la región, tiene disponible [44].

Las pilas de combustible de hidrógeno se usan desde la década de 1960 en naves espaciales. En la década de 1970, empresas como Rocketdyne investigaron posibles usos de transporte comercial para las pilas de combustible, incluidos trenes, barcos, autobuses y camiones y desde 2011 se están creando prototipos de camiones con pila de combustible de hidrógeno [43]. Hoy en día ya se utilizan autos y ómnibus que funcionan con esta tecnología.

La producción de hidrógeno es un tecnología madura; en el mundo actualmente se producen 100 millones de toneladas de hidrógeno y en su mayoría se destina a la industria [45]. Por ejemplo, en Estados Unidos se producen anualmente más de 10 millones de toneladas de hidrógeno destinado a las industrias química, de fertilizantes y alimentaria [42].

Es claro que hay intereses en la producción de hidrógeno debido a la variedad de usos finales que pueden beneficiarse de su disponibilidad [43]. El hidrógeno para el transporte es sólo una pequeña parte de una economía de hidrógeno mucho mayor que se debe planificar. Una economía del hidrógeno requiere un enfoque regional en el suministro de hidrógeno como energía para múltiples usos. Una vez que la producción de hidrógeno a escala está disponible, estos múltiples usos finales se vuelven económicamente viables. El desafío es lograr la producción de hidrógeno a gran escala [43].

4.3 Infraestructura

Existe, en general, consenso sobre la necesidad de extender la penetración del hidrógeno en el sistema energético para lograr objetivos de descarbonización. Sin embargo, aún hay incertidumbre sobre cómo va a evolucionar la producción, el consumo y la distribución.

Por un lado, la eficiencia de la infraestructura depende de los volúmenes de demanda, la infraestructura existente de generación de energía renovable, las tecnologías utilizadas para la producción y el avance de estas. Además, el uso final del hidrógeno también puede influir en cómo se transporta ya que puede ser gaseoso, licuado o también puede ser utilizado localmente para producir otros productos finales, entre otros.

A continuación, se exponen los aspectos pertinentes de infraestructura de la distribución, el almacenamiento y el comercio basado en un reporte realizado por el International Energy Agency [46], un reporte realizado por North American Council for Freight Efficiency (NACFE) [43], el proyecto europeo H2Haul [47] y la información disponible en la página oficial del departamento de Energía de Estados Unidos [48].

4.3.1 Distribución

El hidrógeno se transporta desde el punto de producción hasta el punto de uso a través de tuberías y camiones cisterna para líquidos criogénicos o remolques de tubos gaseosos. En general, los sistemas de tuberías se instalan en zonas con alta demanda estable mientras que las plantas de licuefacción y los camiones cisterna para líquidos se utilizan en regiones con demanda menor o emergente.

En el punto de uso del hidrógeno, los componentes de infraestructura que deben implementarse son comúnmente compresores, tanques de almacenamiento, dispensadores, medidores y dispositivos purificadores y detectores de contaminantes. Por ejemplo, para el uso del hidrógeno como combustible para transporte mediano y pesado, debe ser comprimido de 350bar a 700bar y ser dispensado a una velocidad de 10kg/min.

Tal como se mencionó, el hidrógeno se puede transportar en forma gaseosa por tuberías y remolques tubulares o en forma licuada en tanques criogénicos. Cada forma de transporte tiene ventajas y desventajas y puede ser más costo eficiente según las operaciones específicas. A continuación, se propone explicar cada una de estas formas de distribución, empezando por la distribución de hidrógeno licuado y finalizando con la distribución de hidrógeno gaseoso.

Por un lado, el hidrógeno es comúnmente transportado como líquido cuando se necesita un gran volumen en ausencia de tuberías. El hidrógeno debe enfriarse a temperaturas criogénicas para licuarse mediante el proceso de licuefacción. Para esto, debe someterse el hidrógeno gaseoso por debajo de -253°C . El proceso consume más del 30% del contenido energético del hidrógeno, haciendo que sea un procedimiento costoso. Una vez que se licua, se almacena en tanques aislados y posteriormente se dispensa a los camiones de reparto para el transporte al punto de uso. Finalmente, se vaporiza el producto a alta presión para su posterior dispensación y uso. A diferencia del transporte de hidrógeno gaseoso, cuando las distancias son largas conviene que el transporte sea en formato líquido, debido a que se puede transportar mayor masa.

Por otro lado, en el transporte de hidrógeno en remolques tubulares en donde el hidrógeno está en estado gaseoso, el hidrógeno se comprime a presiones de 180bar o más en cilindros largos que se apilan en un remolque (Figura 8, extraída de un artículo de Energy Efficiency & Renewable Energy). Generalmente se utilizan tubos de acero que transportan aproximadamente 380kg a bordo de hidrógeno, donde la capacidad de carga está limitada por el peso de los tubos.

Actualmente, se están desarrollando recipientes que permitirían tener una capacidad de carga de 560kg a 900kg, utilizados para transportar gas natural.

Figura 8: Camión de remolque tubular



En cuanto al transporte de hidrógeno gaseoso, el transporte por tuberías es una tecnología madura para el hidrógeno, donde el primer sistema de gasoductos de hidrógeno fue realizado en Alemania en 1938 y aún sigue operativo. Actualmente, los gasoductos de hidrógeno cubren más de 5000km, con más del 90% ubicados en Europa y Estados Unidos.

Sin embargo, de manera similar a los sistemas de tuberías de gas natural, crear nueva infraestructura de tuberías para hidrógeno supone proyectos intensivos en capital con altos costos de inversión iniciales. Este es el principal factor que impide el desarrollo de gasoductos para transportar hidrógeno, además de que la demanda es incipiente y no se tienen marcos regulatorios favorables.

En comparación con los sistemas de tuberías de gas natural, un sistema que transporte hidrógeno con un diámetro similar podría costar entre un 10% y un 50% más, debido a la necesidad de paredes de tubería más gruesas. A pesar de esto, la infraestructura existente de distribución de gas natural podría potenciar, en un corto plazo, el transporte de hidrógeno en tuberías, acelerando el comercio internacional. Por un lado, el hidrógeno se puede mezclar con el gas natural para su distribución y, por otro lado, se pueden utilizar las tuberías de gas natural para transportar hidrógeno mediante ajustes a estas a un menor costo. A continuación, se expone acerca de estas alternativas.

4.3.2 Distribución de hidrógeno mezclado con gas natural

Como solución temporal, la mezcla de hidrógeno en las redes de gas puede respaldar el despliegue inicial de hidrógeno con bajas emisiones de carbono y generar reducciones de costos para las tecnologías de producción de hidrógeno. Esta alternativa, sin embargo, presenta barreras relacionadas con las regulaciones de la calidad del gas natural y los requisitos de pureza del hidrógeno de los usuarios finales. Los cambios que pueda sufrir el gas natural pueden ocasionar

la necesidad de ciertas operaciones adicionales y, para que esta opción sea viable, deben cooperar estrechamente ambos mercados de gas.

Adicionalmente, las reacciones entre el hidrógeno y el acero pueden crear fisuras en las tuberías. Por esto motivo, se puede mezclar a tasas de 2-10% de volumen de H₂ sin la necesidad de remodelar las tuberías de acero. En el caso de tuberías de polímeros, se puede alcanzar hasta 20% en volumen de hidrógeno con ninguna o mínimas modificaciones de la red.

A continuación, en la Tabla 8, se muestran los proyectos vinculados a la distribución de hidrógeno mezclado con gas natural que se encuentran en fase de inicio, testeado o totalmente operativos [46].

Tabla 8: Proyectos vinculados a la distribución de hidrógeno mezclado con gas natural

País	Proyecto	% volumen H₂	Fase
Francia	GRHYD	20	Testeo
Italia	Snam	10	Operativo
Reino Unido	HyDeploy	20	Operativo
Australia	Hyp SA	5	Inicio
Estados Unidos	Proyecto de SoCalGas	Hasta 20	Testeado
Canadá	-	2	Inicio

En base a los proyectos mencionados, el transporte de hidrógeno mezclado con gas natural puede aumentar por un factor de 1.3 al que se tiene actualmente, alcanzando más de 4kt H₂. Sin embargo, aún se necesitan más proyectos para alcanzar las 53Mt H₂ necesarias para llegar al escenario de cero emisiones netas en 2030.

4.3.3 Reutilización de sistemas de tuberías de gas natural

Utilizar redes de tuberías originalmente creadas para gas natural para transportar hidrógeno puede disminuir los costos y los plazos de entrega, lo cual podría traducirse en tarifas de transporte más bajas, mejorando la competitividad del hidrógeno.

Los ajustes a las tuberías necesarios pueden ser desde reemplazos de válvulas, medidores y otros componentes, hasta soluciones complejas como reemplazo o recubrimiento de segmentos de tubería, que implicaría excavación. Adicionalmente, deben incluirse nuevos sistemas de detección de fugas y control de flujo, debido a que el hidrógeno tiene una mayor tasa de fuga y un rango de ignición mayor.

En Alemania, la empresa Siemens realizó un análisis técnico del sistema de transmisión de gas y concluyó que las estaciones compresoras en general pueden utilizarse sin modificaciones importantes hasta 10% de volumen de hidrógeno y, más allá de 40% deben ser reemplazadas. La potencia del compresor requerida por unidad de transporte de hidrógeno es aproximadamente tres veces mayor que la del gas natural y esto significa mayores costos operativos.

La primera experiencia de reconversión de una red de tuberías de gas natural a hidrógeno fue en 2018 en los Países Bajos. La empresa Gasunie utilizó 12km de tuberías con una capacidad de 4kt H₂/año y las modificaciones al sistema demoraron de seis a siete meses.

En Europa, se estima que los costos de reconversión de sistemas de tuberías son alrededor del 21-33% de los costos de crear nuevos sistemas específicos para el hidrógeno. Además, se estiman 40.000km de tuberías de hidrógeno en 2040, de las cuales el 75% serían sistemas de gas natural modificados.

4.3.4 Almacenamiento

Acompañando el avance tecnológico de producción y distribución del hidrógeno se encuentra el desarrollo de soluciones de almacenamiento rentables a gran escala y largo plazo. El almacenamiento, según las necesidades operativas, puede ser en tanques aislados de líquidos, tanques de almacenamiento de gases y también existe la posibilidad de almacenar hidrógeno en volúmenes mayores de manera subterránea, lo que permitiría atender a las variaciones de demanda. Hay regiones en las cuales existen formaciones geológicas naturales como cavernas de sal, acuíferos y cavernas rocosas.

Por un lado, el almacenamiento de hidrógeno in situ se utiliza en las instalaciones centrales de producción, las terminales de transporte y en el punto de uso final. La forma más común de almacenar el hidrógeno en tanques es en estado líquido, debido a las grandes cantidades que se pueden almacenar. Los recipientes deben estar a baja presión (no supera los 5bar) y aislados correctamente para almacenar el hidrógeno a -253°C. Independientemente del tipo y de la calidad del aislamiento, el calor que entra a este hace que el hidrógeno hierva, se acumule en la parte superior y, por ende, aumente la presión del tanque. Para bajar la presión debe ventilarse hidrógeno gaseoso, que puede volver a comprimirse mediante un compresor de evaporación para ser nuevamente evaporado. En la Figura 9 se puede ver el tanque de almacenamiento de hidrógeno líquido criogénico, que pertenece al National Renewable Energy Laboratory [48].

Figura 9: Tanque de almacenamiento de hidrógeno líquido criogénico en el National Renewable Energy Laboratory



Por otro lado, el almacenamiento de manera subterránea es común en la industria del gas natural. Desde 1970 la industria petroquímica utiliza el almacenamiento de hidrógeno en cavernas de sal, que son cavidades artificiales que se crean en depósitos geológicos de sal. Actualmente existen cuatro cavernas de sal operativas y numerosos proyectos en desarrollo, siendo una tecnología ya aprobada. Adicionalmente, estas cavernas tienen la ventaja de que admiten altas tasas de inyección y extracción, lo que proporciona alta flexibilidad a corto plazo.

A continuación, en la Tabla 9 se listan los proyectos existentes y futuros relacionados al almacenamiento de hidrógeno ordenados por año de inicio [46].

Tabla 9: Proyectos existentes y futuros relacionados al almacenamiento de hidrógeno

Nombre	País	Inicio	Operador/ Desarrollador	Almacenamiento (GWh)	Tipo	Estado
Teeside	Reino Unido	1972	Sabir	27	Caverna de sal	Operativa
Clemens Dome	Estados Unidos	1983	Conoco Philips	82	Caverna de sal	Operativa
Moss Bluff	Estados Unidos	2007	Praxair	125	Caverna de sal	Operativa
Spindletop	Estados Unidos	2016	Air Liquide	278	Caverna de sal	Operativa
Undergrounds Sun Storage	Austria	2016	RAG	Mezcla 10% H2	Yacimientos agotados	Demostración
HyChino	Argentina	2016	HyChico, BRGM	Mezcla 10% H2	Yacimientos agotados	Demostración
HyShock	Países bajos	2021	EnergyStock	-	Caverna de sal	Piloto
HYBRIT	Suecia	2022	Vattenfall SSAB, LKAB	-	Caverna rocosa	Piloto
Rüdersdorf	Alemania	2022	EWE	0.2	Caverna de sal	En construcción

HyPster	Francia	2023	Storengy	0.07-1.5	Caverna de sal	Estudio de ingeniería
HyGéo	Francia	2024	HDF, Teréga	1,5	Caverna de sal	Estudio de factibilidad
HySecure	Reino Unido	2020	Storengy, Inovvn	40	Caverna de sal	Fase 1 de estudio de factibilidad
Energiepark Bad Lauchstädt Storage	Alemania	-	Uniper, VNG ONTRAS, DBI Terrawatt	150	Caverna de sal	Estudio de factibilidad
Advanced Clean Energy Storage	Estados Unidos	2020	Mitsubishi Power Americas Magnum Development Working	150	Caverna de sal	Propuesto

4.3.5 Comercio del hidrógeno

La comercialización internacional de hidrógeno es una oportunidad para países con recursos renovables para exportar hidrógeno verde. De la misma forma, los productores de gas o carbón también pueden incorporarse al mercado exportando hidrógeno producido a partir de combustibles fósiles.

Comúnmente, el transporte de energía a largas distancias suele hacerse en forma líquida, gaseosa o sintética, en vez de en forma de electricidad. Esto es debido a que los combustibles tienen densidades de energía altas y pérdidas de transporte bajas. Actualmente, la mayoría del gas en el mundo se transporta en gasoductos o como GNL en barcos y para el transporte de hidrógeno se espera un alcance similar. Adicionalmente, existe la posibilidad, como se mencionó anteriormente, de transportar mediante camiones a nivel local.

Actualmente, el hidrógeno se almacena como gas comprimido o en forma licuada en tanques porque es utilizado de manera local a pequeña escala. Sin embargo, la comercialización internacional del hidrógeno supone nuevos desafíos y nuevas formas de transportar el hidrógeno de manera ininterrumpida.

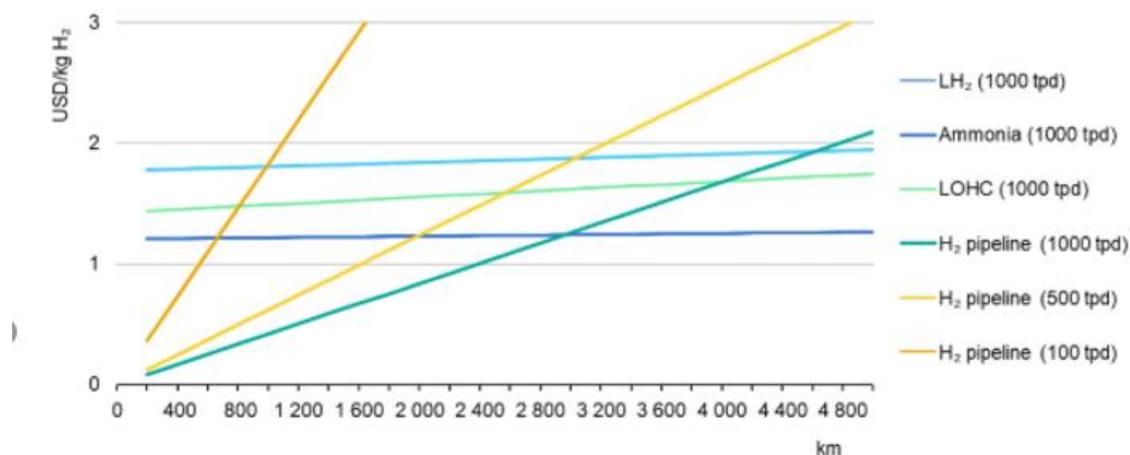
Para el transporte marítimo de hidrógeno se tienen varias opciones donde una forma es transportarlo de forma licuada. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, este proceso requiere una temperatura de -253°C por lo cual consume mucha energía. Otra opción es convertir el hidrógeno en otra molécula como amoníaco o transportarlo con un líquido orgánico portador de hidrógeno (LOHC: Liquid Organic Hydrogen Carrier). El amoníaco ya se comercializa de manera internacional como un producto químico, aunque al ser tóxico se pueden ocasionar problemas de seguridad y de aceptación, además de que requiere capacitación profesional para tratarlo. Este hidrógeno se convertiría en amoníaco y luego del transporte se debería reconvertir en hidrógeno en el punto de destino. La ventaja de esta conversión radica en que el amoníaco

licua a -33°C , que es una temperatura mucho mayor a la del hidrógeno y, por ende, es un proceso que consume menor cantidad de energía. Los LOHC tienen propiedades similares al petróleo crudo y la principal ventaja es que pueden transportarse sin licuefacción. Sin embargo, los procesos de conversión/reconversión y posterior purificación son costosos. Un desafío adicional es que las moléculas LOHC son costosas y luego de transportar el hidrógeno deben regresar al destino.

La complejidad de la comercialización del hidrógeno y los altos costos asociados hacen que sea posible evaluar la alternativa de producir hidrógeno con bajo nivel de carbono, idealmente verde en vez de importarlo. Esta evaluación por naturaleza va a depender de las condiciones locales y pueden existir restricciones en cuanto a la generación CO_2 que obliguen la importación para satisfacer las demandas de hidrógeno.

A continuación, la Figura 10 compara los costos en dólares por kilogramo de hidrógeno de transportar hidrógeno gaseoso en tuberías (H_2 pipeline) e hidrógeno licuado, LOHC y amoníaco en barco [46]. Las cantidades en unidades “tpd” se refieren a toneladas por día. Los costos incluyen la conversión, la exportación, el envío, la importación y los costos asociados a la reconversión, si corresponde.

Figura 10: Costos de transportar hidrógeno para 2030



Finalmente, a continuación, en la Tabla 10 se muestran los proyectos futuros relacionados con la comercialización del hidrógeno [46]. El volumen transportado se presenta en toneladas por año (tpa). En la última columna se hace una referencia a la posición del mapa que se puede ver en la Figura 11, imagen traducida de un informe de la International Energy Agency (IEA) [46].

Tabla 10: Proyectos de comercialización de hidrógeno

Proyecto	Exportador	Importador	Volumen (tpa)	Portador	Año de primer envío esperado	Referencia en mapa
----------	------------	------------	---------------	----------	------------------------------	--------------------

Hydrogen Energy Supply Chain	Australia	Japón	225 540	LH ₂	2030	1
H2 Sines	Portugal	Países Bajos	A determinar	A determinar	A determinar	2
Stanwell - Iwatani Gladstone project	Australia	Japón	280 000	LH ₂	2026	3
Helios Green Fuels	Arabia Saudita	A determinar	650	Amoníaco	2025	4
H2Gate	A determinar	Países bajos	1 000 000	LOHC	A determinar	5
ADNOC - TA'ZIZ industrial hub	Emiratos Árabes	A determinar	175 000	Amoníaco	2025	6
Asian Renewable Energy Hub	Australia	Japón o Corea	A determinar	LH ₂ o amoníaco	2028	7

Tabla 11: Proyectos de comercialización de hidrógeno (continuación)

Murchison Crystal	Australia	A determinar	A determinar	A determinar	A determinar	8
Crystal Brook Energy Park	Australia	A determinar	25	A determinar	A determinar	9
Pacific Solar Hydrogen	Australia	A determinar	200 000	A determinar	A determinar	10
Origin Energy - Kawasaki Heavy Industries Townsville project	Australia	Japón	36 000	LH ₂	2025	11
KBR SE Asia feasibility study	Sureste de Asia	A determinar	A determinar	A determinar	A determinar	12
Eyre Gateway	Australia	Japón o Asia	7 000	Amoníaco	A determinar	13
Unnamed	A determinar	Singapore	A determinar	LH ₂	A determinar	14
Unnamed	A determinar	Singapore	A determinar	LOHC	A determinar	15
Project Geri	Australia	A determinar	175 000	Amoníaco	A determinar	16
Green Mega Fuels Project	Omán	A determinar	175 000	Amoníaco	2032	17
Western Green Energy Hub	Australia	A determinar	34 000	Amoníaco	A determinar	18
H2U	Uruguay	A determinar	A determinar	A determinar	A determinar	-

Figura 11: Proyectos de comercialización de hidrógeno situados en el mapa mundial

4.4 Operación

Para tomar en cuenta un FCEV debe tenerse en cuenta las operaciones específicas de la flota. Cabe mencionar que ambas tecnologías de camiones eléctricos (a batería y a hidrógeno) son complementarias. Mientras que los BEV son ideales para operaciones con 150-250 km diarios, con retorno al centro de distribución para recargar la batería, los FCEV presentan la ventaja de que tienen un tiempo de llenado de tanque muy bajo en comparación a las horas de recarga de batería y una autonomía mayor, que hace posibles operaciones con muchos km diarios y no necesariamente con retorno a la base. Además, como se mencionó en apartados anteriores, las celdas de hidrógeno permiten transportar mayores cargas.

Algunos de los puntos para tener en cuenta para considerar el uso de camiones fueron resumidos en el reporte realizado en 2020 por NACFE [43]:

- Es importante para tu flota disminuir las emisiones generadas en la operación
- El peso de la tara de los camiones es crítico para maximizar la carga útil transportada
- Se realizan recorridos de más de 800km con frecuencia
- Está disponible en tu región hidrógeno verde o azul
- Hay incentivos que viabilicen el uso del hidrógeno

4.4.1 Recarga de hidrógeno

El hidrógeno, al igual que los combustibles fósiles, se deberá cargar en estaciones de servicio que suministren hidrógeno, ya sean propias o públicas.

El tiempo que se demora en llenar el tanque de combustible es una de las mayores ventajas que tiene el hidrógeno frente a las baterías. La siguiente tabla (Tabla 12) muestra el estado actual de autos y ómnibus y las predicciones de camiones para 2030 y 2050 [43].

Tabla 12: Estado actual y estimaciones de la tecnología del hidrógeno

	Estado de vehículos particulares (2015)	Estado de ómnibus (2017)	Objetivo camiones pesados (2030)	Objetivo camiones pesados (2050)
Capacidad del tanque (kg)	2-5	32	60	60
Autonomía (km)	320-500	480	1200	1200
Tiempo de recarga (min)	5-6	22-24	10	6
Eficiencia de la recarga (kg/min)	0,35	1-1,5	8	10

Cabe destacar que, en las estaciones de carga, el nivel de presión de suministro de hidrógeno determina el tipo de vehículo que puede hacer uso de la estación. Mientras que los vehículos de

particulares tienen tanques de hasta 700bar, los camiones y ómnibus, que cuentan con mayor espacio disponible para los tanques, pueden operar con hidrógeno a 350bar [49].

4.4.2 Costo del hidrógeno y rendimiento

Hay mucha incertidumbre y es muy pronto para estimar el precio que verá el consumidor en una estación de hidrógeno en Uruguay. Este precio depende de diversos factores y entre ellos el principal es el costo de producción. Actualmente, según un estudio realizado por IEA [46], producir el hidrógeno a partir de energía renovables tiene un costo desde 3USD a 8USD por kilogramo, mientras que producirlo a partir de gas natural cuesta entre 0,5USD y 1,7USD por kilogramo. En el mismo estudio se estima que aquellas zonas que tengan generación de energía mayoritariamente renovable verán una disminución del costo más pronto, alcanzando en 2030 entre 1,3 y 3,5USD por kg.

En cuanto al consumo del hidrógeno, un camión de clase 8 (peso bruto inferior 15.000 kilogramos y transporte de cargas muy pesadas a larga distancia) es entre 8,8 y 14,8 km por kg de hidrógeno [50].

4.4.3 Seguridad

Cualquier combustible que se utilice para el transporte tiene que ser seguro, porque así lo determina el mercado que utiliza la tecnología. Es por este motivo que tanto los fabricantes de camiones como las empresas distribuidoras de hidrógeno ponen especial foco en la seguridad [43].

Como se comentó anteriormente, el hidrógeno se ha utilizado de forma segura durante muchas décadas y como con cualquier otro combustible, existen estándares internacionales para el manejo del combustible y para la mitigación de riesgos asociados [42]. El hidrógeno es tan seguro como cualquier otro combustible y los tanques son sometidos a pruebas rigurosas que incluyen pruebas de choque, disparos y requisitos de rendimientos [42]. Además, los materiales utilizados para los tanques son de alta resistencia y son sometidos a más del doble de la presión máxima de servicio [42].

Por otro lado, las estaciones de carga de combustible de hidrógeno que ya existen tienen sistemas de protección redundantes por lo que es inviable sobre presurizar el tanque en el momento de hacer la recarga [42].

En cuanto al hidrógeno como combustible, éste presenta ciertas ventajas frente a otros combustibles fósiles. Entre ellos se encuentra que no es un gas tóxico, se disipa rápidamente a la atmósfera en caso de que el tanque tenga un fallo o una pérdida e irradia menos calor cuando se quema [43]. Vinculado al último punto, como cualquier otro combustible, el hidrógeno debe entrar en contacto con un elemento oxidante (como el aire) para reaccionar y liberar su energía química almacenada. En los tanques de hidrógeno, a diferencia a los tanques de los demás

combustibles fósiles, no hay presencia de ningún agente oxidante [42]. De esta forma, si por algún motivo se tiene una perforación del tanque y el hidrógeno escapa, esta liberación evita que entre oxígeno y que pueda producir una explosión en el tanque [42]. Además, el hidrógeno es 14 veces menos denso que el aire por lo que tiende a subir rápidamente en la atmósfera, provocando que la explosión ocurra por encima del camión y no por debajo, como ocurre con los combustibles fósiles cuando hay pérdidas.

5. Comparación entre tecnologías

Las tecnologías presentadas en las secciones anteriores son alternativas viables para descarbonizar el sector de transporte. Los usos y las aplicaciones, así como los avances en cada una de ellas varía. A continuación, se presenta una comparación de los camiones eléctricos a batería y los camiones eléctricos con celda de combustible. Sin embargo, es importante destacar la complementariedad que tienen ambas tecnologías debido a las diferencias en tiempos de recarga, autonomía, capacidad de carga de mercadería, entre otros.

5.1 Características

A continuación, la Tabla 15 muestra una comparativa elaborada por Shell y Deloitte en 2021 [15] en la cual se muestran las principales diferencias entre las dos tecnologías estudiadas, comparándolas con la tecnología de combustión interna.

Tabla 13: Comparación entre tecnologías. Elaboración propia.

	Diésel	Eléctrico a batería	Eléctrico con celda de combustible
Energético	Diésel	Batería	Hidrógeno
Tren motriz	ICE	Motor eléctrico	Motor eléctrico
Combustible de uso directo	N/C	No	No
Carbón-cero	No	Sí	Sí
Autonomía (km)	>1500	~200 ~800 (planificado)	400-1.200
Tiempo de recarga (h)	0,3-0,4	>3 >7	0,3-0,4
Peso del tren motriz (kton)	~3	~2,2 ~4,9	~2,6
TCO y costo inicial del camión			

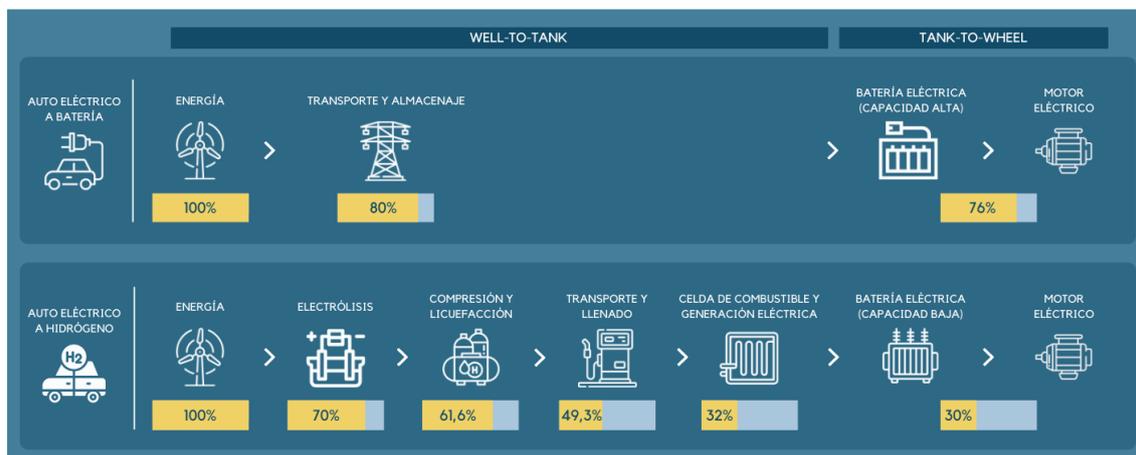
■ En/Por encima de paridad ■ A penas por debajo de paridad ■ Debajo de paridad

Cabe destacar que la autonomía de 800 km para un camión eléctrico a batería fue puesta en virtud del Tesla Semi. Los tiempos de recarga fueron calculados con cargadores rápidos de 150kW. Si se usan cargadores lentos el tiempo puede aumentar hasta en siete veces. El peso del tren motriz incluye motor, sistema de enfriamiento, transmisión y combustible/baterías. Se suponen baterías de 270 kWh y 1100 kWh para BEV (correspondientes a las dos columnas que se muestran en el gráfico), se supone un paquete de baterías de 250 kWh para FCEV, la densidad de energía del paquete de baterías de 0,25 kWh/kg y el consumo de energía de 1,15 kWh/km con un 85% de uso de la batería. Finalmente, se asume que el motor eléctrico y la caja de cambios son 600 kg, y la pila de combustible eléctrica se asume que 470 kg.

En cuanto a eficiencia, el estudio realizado por Smart Freight Centre [3] revela una comparación entre ambas tecnologías basada en las pérdidas energéticas desde la obtención de la energía hasta su uso final. Este estudio se realizó para vehículos de pasajeros, pero se puede trasladar los valores

aproximados a camiones de carga dado que esencialmente la tecnología es la misma. De este estudio se extrae y traduce la Figura 12, en la que se observa el porcentaje de eficiencia en cada fase de producción y utilización. En el caso del hidrógeno, las múltiples fases y procesos, y las bajas eficiencias de estos, hacen que la eficiencia global sea sensiblemente más baja, siendo 30% frente al 76% correspondiente a la tecnología de batería eléctrica.

Figura 12: Comparación de eficiencia energética entre BEV y FCEV

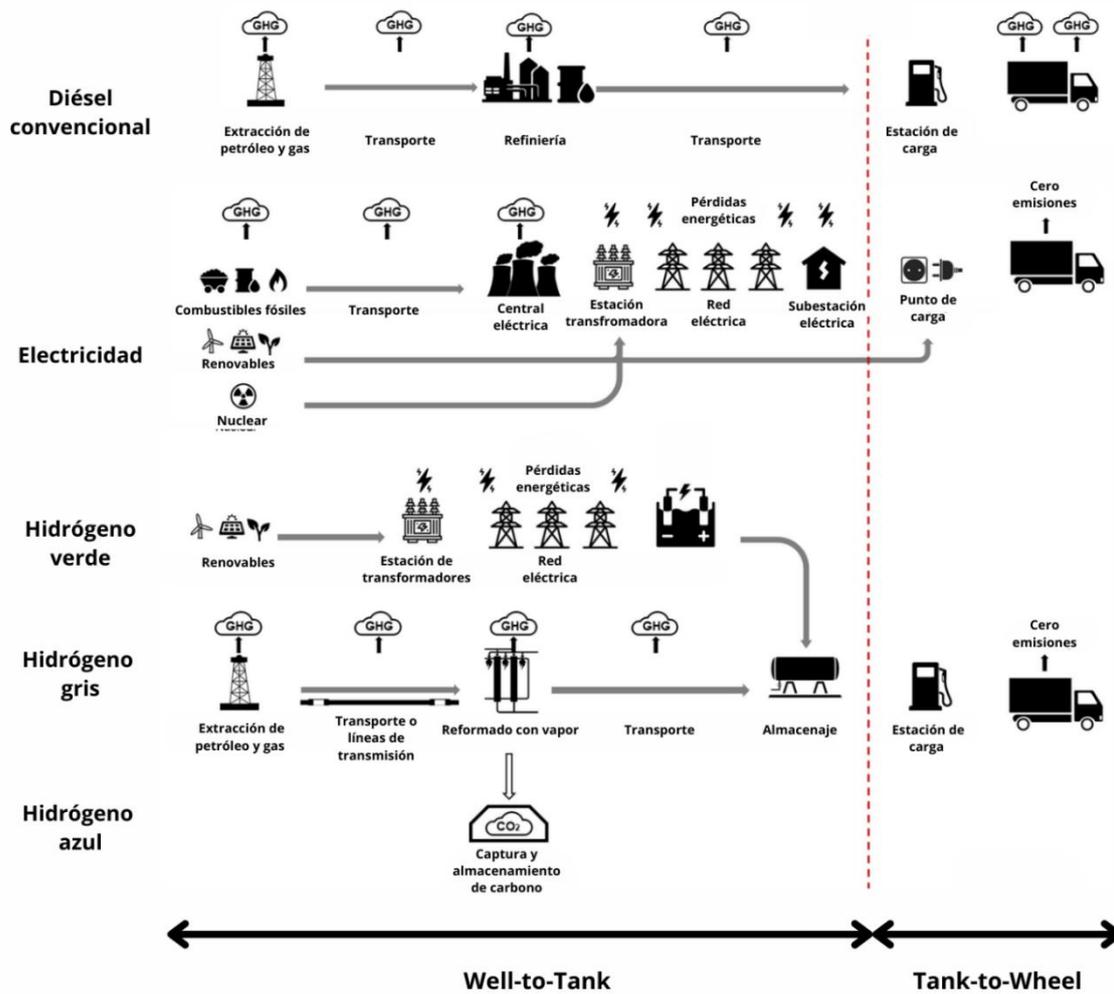


5.2 Impacto ambiental y ciclo de vida

En términos de emisiones, para analizar ambas alternativas de camión eléctrico (a batería y con celda de hidrógeno), y compararlas con la tecnología convencional del diésel, es necesario contemplar toda la trayectoria del combustible o de la energía hasta el momento en el que se usa. Para esto, se presenta el análisis realizado por Smart Freight Centre [3], que detalla de forma esquemática el ciclo completo de cada combustible. Es relevante notar la importancia de que el ciclo en su completitud sea neutro en término de emisiones, pudiendo en ciertas operaciones emitir carbono a la atmósfera (carbono-positivo) o captar carbono de ella (carbono-negativo). Este criterio debe ser considerado cuando se evalúa la adopción de las distintas tecnologías.

En la Figura 13 se muestra la trayectoria del diésel convencional, la electricidad y el hidrógeno. El diagrama que se presenta es una versión modificada del que se encuentra en el reporte “Low Emission Fuels and Vehicles for Road Freight” [3]. Se diferencian las operaciones involucradas en el Well-to-Tank (desde la obtención del energético hasta el almacenamiento) y aquellas que forman parte del alcance del Tank-to-Wheel (desde el almacenamiento hasta el uso). En los siguientes apartados se propone detallar cada uno de estos ciclos.

Figura 13: Well-to-Wheel de las tecnologías estudiadas



5.2.1 Well-to-Wheel diésel

Tal como se observa en la Figura 13, todas las fases de la trayectoria del diésel son carbono positivas, lo que significa que emiten gases de efecto invernadero. Las emisiones pueden tener variaciones dependiendo del porcentaje de diésel en el combustible. Cuando el combustible es 100% diésel, los parámetros de emisiones están firmemente establecidos y presentan sólo pequeñas variaciones. Esto es debido al desarrollo del mercado global, en donde hay estándares fijados en cuanto a calidad del combustible y la tecnología del motor de combustión.

Cuando el combustible que se utiliza contiene un porcentaje de biodiésel, las emisiones bajan en el análisis Well-to-Wheel porque la materia prima contribuye a la neutralización del carbono al absorberlo. En aquellos combustibles con un porcentaje menor al 7% de biodiésel, hay ciertos estándares de emisiones, pero las variaciones provienen de la procedencia de la materia prima y el tipo de materia prima, principalmente. Cuanto mayor sea el porcentaje de biodiésel, mayor es la incertidumbre acerca de las emisiones.

5.2.2 Well-to-Wheel BEV

Cuando el transporte es eléctrico, la gran mayoría de las emisiones se concentran en las fases de obtención de la energía. Es por esta razón que los resultados del análisis dependen de la matriz energética de cada país. Para que el estudio sea más riguroso, también se debe tomar en cuenta la matriz de abastecimiento, dado que existe un mercado entre países para solventar los déficits y los excesos energéticos.

Los resultados favorables se muestran cuando la energía es renovable dado que en este caso las pérdidas se dan únicamente en las estaciones eléctricas y en el abastecimiento. Además, cabe destacar que, a diferencia del camión con diésel, el análisis Tank-to-Wheel del camión eléctrico es carbono neutro, dado que no emite contaminaciones al momento de uso.

En el caso particular de Uruguay, en promedio desde 2016, el 95% de la energía generada proviene de fuentes renovables y el restante 5% corresponde a la generación con combustibles fósiles [18]. Esta situación favorece, en cuanto a emisiones, al transporte eléctrico en el análisis Well-to-Tank, comparado con las demás tecnologías.

5.2.3 Well-to-Wheel FCEV

Al igual que con los BEV, el estudio Well-to-Tank de los FCEV es imprescindible para evaluar los beneficios de la tecnología en cuanto a emisiones y eficiencia.

El hidrógeno se puede generar con diversos métodos que condicionan el nivel de emisiones, tal como se detalló en la sección 4.2. El hidrógeno llamado “gris” se obtiene a partir de metano fósil en un proceso denominado Reformación de Metano con Vapor (SMR: Steam Reforming). En este proceso las emisiones de GEI son altas y son liberadas al ambiente. En esta metodología, todas las fases, hasta el almacenamiento, genera emisiones. El hidrógeno “azul” se obtiene de la misma forma que el gris con la diferencia que se capta el dióxido de carbono generado en el proceso SMR. De esta forma, las emisiones disminuyen considerablemente. Por último, el hidrógeno verde se genera a partir de fuentes de energía renovables en donde las emisiones son nulas a lo largo de la trayectoria del combustible.

6. Contexto uruguayo

Luego de la revisión de las tecnologías de camiones eléctricos a batería y camiones eléctricos con celda de combustible, se propone en esta sección detallar el contexto nacional en el cual se insertarían estas tecnologías. En primer lugar, se listarán los incentivos vigentes. Luego, se presenta el avance que el hidrógeno ha tenido en Uruguay y las futuras proyecciones. Finalmente, se listan los modelos de camiones eléctricos disponibles en el mercado uruguayo.

6.1 Incentivos

Uruguay actualmente incentiva la movilidad eléctrica y la incorporación de energéticos alternativos con el objetivo de lograr la soberanía energética, disminuir las emisiones atmosféricas y la contaminación sonora. Uruguay presenta condiciones favorables para el desarrollo del transporte de carga con camiones eléctricos en cuanto a generación e infraestructura, y es por esta razón que se han desarrollado políticas que promueven la comercialización de esta tecnología.

A continuación, se listan las iniciativas que suponen beneficios económicos para empresas, producto de la incorporación del transporte utilitario¹⁰ eléctrico [51].

1. Reducción del Impuesto Específico Interno (IMESI) (Decreto 246/012) para híbridos y eléctricos

A partir del primero de enero 2022 los vehículos eléctricos 0km estarán exonerados del pago de IMESI [52].

2. Ley de Promoción de Inversiones (Decreto 02/12)

La ley otorga beneficios a proyectos cuya inversión genere beneficios en diferentes sectores. En particular, si la empresa presenta un proyecto donde hay inversión en vehículos utilitarios eléctricos, la misma se reduce desde un 30% hasta más de un 70% a través de la exoneración de IRAE (Impuesto a las Rentas de las Actividades Económicas). En los casos más auspiciosos el retorno del proyecto supera el 40%.

3. Certificados de eficiencia energética

Instrumento económico del MIEM (Ministerio de Industria, Energía y Minería) para premiar las medidas de eficiencia energética realizadas. Beneficio económico: del 3% a 30% de la inversión.

4. Exoneración de tasa global arancelaria (TGA) (Decreto 410/016)

Transporte de mercancías sólo con motor eléctrico: 0% TGA.

¹⁰ Se establece que son vehículos utilitarios los chasis para camiones, camiones, tractores para remolque, remolques, zorras y ómnibus para el transporte de pasajeros (redacción dada por el artículo 6° Decreto N° 544/008 de 10.11.008)

Esto se debe a que Uruguay no tiene producción nacional de vehículos eléctricos, por lo que se promovió la importación con la eliminación de los aranceles de importación (de 23% a 0%).

5. Descuento comercial UTE [53]

- Cambio de potencia contratada sin costo.
- Tarifa en valle (00:00 a 7:00) al 50% en las estaciones de recarga de UTE.
- Tarifas mediano consumidor y tarifa doble residencial al 50% en horario fuera de punta (18 a 22).

6. Bonificación de seguros del BSE (Banco de Seguros del Estado) para camiones eléctricos

El área de Demanda Acceso y Eficiencia Energética (DAEE) de la Dirección Nacional de Energía (DNE), dentro del MIEM, ofrece Certificados de Eficiencia Energética (CEE) que permiten obtener un ingreso monetario por las medidas implementadas.

7. Créditos verdes

A través de MOVÉS, instituciones financieras como BBVA, Itaú y HSBC crearon los créditos verdes, específicos para la compra de vehículos eléctricos. Este incentivo busca reducir la barrera de compra a través de una mejora en las condiciones de financiamiento de estos vehículos.

6.1.1 Comparación entre Uruguay, la región y el mundo

Al igual que Uruguay, muchos países en América Latina están implementando legislaciones y proyectos para fomentar la movilidad eléctrica. A pesar de que la mayoría de los proyectos son enfocados en la transición del transporte público y de particulares, y no en la transición del transporte de carga, las normativas son en su mayoría compartidas con este sector y favorecen su inserción.

En general, todos los países de América Latina tienen un plan estratégico de movilidad eléctrica en los cuales se fijan objetivos nacionales alineados con los objetivos asumidos internacionalmente y líneas de acción para el cumplimiento de dichos objetivos. En la Figura 14, elaborada a partir de las legislaciones de países selectos de América Latina [59]–[73], se muestran los incentivos vigentes y en proceso de aplicación de doce países de la región.

Figura 14: Incentivos para la movilidad eléctrica en América Latina



Tal como se puede observar, Costa Rica y México son los países con mayor implementación de incentivos y regulaciones vinculadas a la movilidad eléctrica. En general, todos los países analizados cuentan con una estrategia nacional de movilidad eléctrica y están en vías de tenerla. La exención o reducción de impuesto de importación es el incentivo mayormente adoptado, lo cual se puede vincular al hecho de que el precio de compra es una de las barreras principales para la inserción de la tecnología.

Al igual que en la región, mundialmente, numerosos países han implementado planes con subsidios y exenciones tributarias con la finalidad de promover la movilidad eléctrica. En la Tabla 14 se presentan aquellos países que lideran la transición, destacándose mediante las políticas y normativas aplicadas [74].

Tabla 14: Incentivos para la movilidad eléctrica en países de referencial mundial

Noruega	<ul style="list-style-type: none"> • Sin impuestos de compra/importación (desde 1990) • Exención del 25% de IVA en la compra (desde 2001) • Exención del impuesto anual de circulación (desde 1996) • Exención de cargos de peaje en carreteras (implementado entre 1997 y 2017) • Máximo 50% del monto total en tarifas de ferry y peajes (para los años 2018 y 2019) • Aparcamiento municipal gratuito (implementado entre 1999 y 2017) • Acceso a carriles de autobuses (a partir de 2005) • Exención del 50% del impuesto a la empresa de automóviles (entre 2000 y 2018) • Exención del 40% del impuesto a los automóviles de la empresa (a partir de 2018) • Exención del 25% de IVA en arrendamiento (a partir de 2015) • Compensación fiscal por la chatarrización de furgonetas fósiles (a partir de 2018) • El impuesto de compra para todos los automóviles de combustión interna. Se calcula mediante una combinación de peso, emisiones de CO₂ y NO_x. El impuesto es progresivo, lo que hace que los automóviles grandes con altas emisiones sean muy costosos
China	<ul style="list-style-type: none"> • Subsidio a vehículos eléctricos según su autonomía. Por encima de 400 Km hasta € 6.250 • Desmonte del 50% del plan de subsidios para autonomías menores de 300 Km (dado la maduración del mercado) • Se aumento el techo de autonomía mínima para el subsidio a 100 Km • Se manejan subsidios particulares por ciudades
Estado Unidos (California)	<ul style="list-style-type: none"> • Reembolso de USD 5,000 para vehículos eléctricos de celda de hidrógeno (FCEV), USD 2,500 para vehículos eléctricos a batería (BEV), y USD 1.500 para vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV). Monto más elevado para hogares con ingresos iguales o inferiores al 300 por ciento del umbral federal de pobreza • Tarifas preferenciales de energía • Programa estatal de financiamiento de vehículos

Por un lado, Noruega, se encuentra dentro de los países que ha tenido mayores avances hacia el transporte de cero emisiones. Esto es debido a los objetivos ambiciosos del país acompañados de incentivos y políticas que se han ido introduciendo desde 1990. Se observa que una de las estrategias adoptada por Noruega fue basada principalmente en gravar los vehículos a combustión interna en vez de únicamente brindar subsidios para adoptar la nueva tecnología [54].

Por otro lado, China es el país con mayor desarrollo de la movilidad eléctrica principalmente debido a tanto las políticas públicas, con el objetivo de disminuir la contaminación atmosférica, como los subsidios, exenciones de impuestos y promoción de producción de vehículos eléctricos que por consecuencia ha desincentivado la creación de fábricas de vehículos de combustión interna.

Finalmente, Estados Unidos [55] tiene el tercer mercado de vehículos eléctricos más grande del mundo, después de China y Europa. Si bien California es el estado que lidera la transición hacia la movilidad eléctrica, actualmente, 45 estados y el Distrito Federal de Columbia cuentan con incentivos y apoyos para la implementación de combustibles alternativos en el transporte. Adicionalmente, quince estados se están enfocando específicamente en el transporte de carga mediana y pesada, mediante un acuerdo estatal en donde se comprometen a acelerar la adopción

de la tecnología en el sector. El objetivo principal del acuerdo es que el 100% de todas las ventas de vehículos nuevos de servicio mediano y pesado sean vehículos de cero emisiones para 2050.

6.2 Avance en hidrógeno

Actualmente se encuentra vigente el [Proyecto H2U](#) que busca posicionar a Uruguay como productor y abastecedor de demandas locales y, eventualmente, exportador de hidrógeno verde.

ANCAP impulsa este proyecto como una continuación del proyecto VERNE. El nuevo proyecto tiene tres focos principales: hacer un piloto para transporte pesado de buses y camiones, producción de hidrógeno on-shore y producción de hidrógeno off-shore. Se busca la inversión de privados para la generación de energía renovable dedicada a la producción de hidrógeno. De esta manera, el modelo de negocios va a ser totalmente privado, debido a que las empresas deben aportar una flota vehicular de ómnibus y camiones y deberán mantener contratos de demanda energética según sus necesidades. Se busca hacer un proyecto piloto con al menos diez ómnibus de nueve metros de largo o camiones de 17 toneladas, donde la distancia mínima que recorra la flota sea 3500km por día. Los inversionistas privados deberán instalar una planta propia, aunque va a ser posible utilizar las instalaciones de ANCAP en la planta de Capurro. Además, estará vigente la Ley de Promoción de Inversiones y se prevén apoyos públicos adicionales para fomentar las inversiones.

Un foco grande del proyecto es crear una granja eólica off-shore. Las investigaciones hechas por ANCAP demuestran que existen dos zonas de aproximadamente 2000m² cada una en donde las condiciones del viento y la profundidad son óptimas para la instalación de molinos. A partir de licitaciones, se conceden bloques del territorio marítimo uruguayo para la generación de energía y la producción de hidrógeno in situ.

Este proyecto está enmarcado en Uruguay, que tiene una serie de características que lo posicionan como potencial productor de hidrógeno verde. A continuación, se listan los atributos [56]:

1. Potencial generador: Uruguay posee gran potencial para la generación de energía eléctrica a partir de energía eólica y solar fotovoltaica. Además, tiene la posibilidad de expansión off-shore.
2. Complementariedad: Uruguay cuenta con altos factores de capacidad (aprox. 60%) por la complementariedad entre solar y eólica on-shore.
3. Disponibilidad de renovables: La alta disponibilidad de energía eléctrica renovable puede ser aprovechada en un proceso inicial.
4. Logística: Uruguay posee puertos con acceso al océano atlántico y rutas de acceso a todo el país.

Si bien las oportunidades son grandes y se están realizando esfuerzos a nivel país para impulsar el hidrógeno verde como forma de escalar la economía y aportar a la descarbonización del sector,

aún se está en una fase inicial. Esta fase se caracteriza por tener grandes incertidumbres, de parte del gobierno, de parte de los inversores e incluso de parte de los potenciales usuarios. Debido a esto, ha habido numerosas conferencias, webinars y seminarios tratando la temática.

A continuación, con la intención de reflejar los avances en esta área de difusión, se propone mencionar los distintos puntos de vista y opiniones presentados en una mesa redonda sobre hidrógeno, en la cual participaron Jorge Ferreiro, director de Hidrógeno en ANCAP, y Fernando Schaich, fundador de SEG Ingeniería. En ella se analizó el potencial que tiene Uruguay para el mercado del hidrógeno.

Por un lado, Jorge Ferreiro sostuvo que Uruguay cuenta con tres drivers para la producción de hidrógeno:

1. Ambiental: descarbonizar el mundo ya forma parte de la agenda social y de la agenda de los gobiernos.
2. Los costos van a ir bajando a medida que se va escalando la producción
3. Hay apetito de inversores en invertir en energías verdes como inversiones a largo plazo

Además, Fernando Schaich, sostuvo que Uruguay presenta dos ventajas principales para la producción de hidrógeno verde:

1. Si bien cuando se compara con Chile o Brasil, Uruguay no es el mejor posicionado en generación de energía a partir de energía solar o eólica, Uruguay tiene la ventaja de que tiene disponible ambas energías y que estas se complementan (generación baja de energía solar coincide con generación alta de energía eólica y viceversa).
2. Uruguay es un mercado seguro y con bajo riesgo y tasas, lo cual es muy buscado por inversores.

Tanto Fernando Schaich como Jorge Ferreiro estuvieron de acuerdo en que hasta que se empieza a producir y utilizar hidrógeno puede pasar un período de tiempo de ocho a diez años.

6.3 Oferta de camiones eléctricos

A continuación, se muestra en la Figura 15 todos los camiones eléctricos en el mercado uruguayo actualizado hasta diciembre 2021.

Figura 15: Modelos de camiones eléctricos disponibles en Uruguay

Marca	Imagen	Modelo	Peso bruto (kg)	Tara (kg)	Carga útil (kg)	Precio (USD)	Capacidad batería (kWh)	Horas de carga (hs)	Autonomía (km)	Garantía batería (años)	Garantía batería (km)	Tipo de batería	Marca de batería
JAC		I063 EVI	6490	3350	3140	49900	96.77	3	200	8	150000	LFP	
Mobility		E200X	9000	3400	5600	63250	106.95	2.5	250	8	150000	Litio	CATL
Mobility		E200M	5900	2470	3430	52250	81.14	2.5	200	8	150000	Litio	CATL
BYD		T4C	4300	1850	2450	68000	63.63	1.7	170	5	500000	Litio	BYD
BYD		T45C01	6495	2800	3695	87000	99	1.2	210	5	500000		BYD
BYD		T7BG	11800	4750	7050	131000	177.74	2.5	230	5	500000		BYD
Dong Feng		e-Tuyi	4495	2495	2000	38805	55.7	2	200	5	-	LFP	CATL
Dong Feng		e-Shang			3500	Según especificaciones	81.4	2	200	5	-	LFP	CATL
Dong Feng		e-Don				Según especificaciones	98.04		150/250 (opcional)	5	-	LFP	CATL

7. Conclusiones

En este documento se pudo observar la importancia de los desafíos ambientales que se están transcurriendo mundialmente, y que el sector transporte de carga con camiones presenta gran potencial aún no explotado en combatir contra esto. Una de las maneras de hacer frente a los desafíos ambientales en este sector es a través de la implementación de tecnología de cero emisiones, profundizándose en los vehículos eléctricos a batería y en los vehículos eléctricos con celda de combustible. En especial, Uruguay está muy bien posicionado para implementar estas tecnologías debido a su alto porcentaje de energía renovable en la matriz energética.

Los camiones eléctricos a batería se destacan por varios factores, entre ellos su gran eficiencia del motor a la rueda, siendo un 85%, comparado con un 30% en camiones convencionales. Un diferencial de esta tecnología que permite mayores eficiencias es el frenado regenerativo, que utiliza al motor del vehículo eléctrico como generador para convertir gran parte de la energía cinética perdida al desacelerar en energía almacenada en la batería. Con respecto a las baterías de estos camiones se esperan grandes mejoras en sus densidades de energía, vida útil y costos en los años próximos. La manera de cargar estas baterías es a través de un cargador SAVE, que garantiza la correcta recarga y seguridad de las personas. Para camiones eléctricos se recomienda utilizar cargadores de corriente alterna de 8 a 44kW o cargadores de corriente continua de más de 44kW en caso de necesitar recargas más rápidas, aunque esto implique un mayor costo de instalación. Por otro lado, con respecto a la operación de los camiones a batería se recomienda que sus conductores reciban una capacitación adecuada, ya que son una tecnología muy distinta a los camiones convencionales.

La tecnología del hidrógeno tiene muchas aplicaciones además del transporte de carga. Debido a esto, su producción es una tecnología muy madura y segura. Existen distintas maneras de producir el hidrógeno y cada una tiene un color distinto asociado como nombre. Los principales son el hidrógeno verde, producido a partir de energía 100% renovable, el hidrógeno gris y el marrón, que son producidos a partir de gas natural y combustibles fósiles respectivamente, y el hidrógeno azul, que es uno de tipo gris o marrón cuando el CO₂ es capturado. Previo a su almacenamiento y consumo se lo transporta desde el punto de producción hasta el punto de uso a través de tuberías o camiones cisterna para líquidos criogénicos o remolques de tubos gaseosos. El almacenamiento, puede ser en tanques aislados de líquidos, tanques de almacenamiento de gases y de manera subterránea para volúmenes mayores. Con respecto a la operativa de estos camiones cumplen un rol complementario a los camiones a batería. Mientras que estos últimos son ideales en recorridos de 150-250 kilómetros diarios, con retorno al centro de distribución, el camión de celda de combustible es ideal para mayores distancias, sin necesariamente retornar al centro de distribución. Esto se debe principalmente a su mayor autonomía, tiempo de llenado de tanque muy bajo y capacidad de transportar mayores cargas. Un aspecto en el cual se espera avanzar

significativamente en los siguientes años es en el costo de la producción del hidrógeno, dado que su situación actual impide una mayor comercialización.

Uruguay está explotando sus oportunidades de implementación de tecnologías cero emisiones a través de varios incentivos, y también a través de proyectos como el H2U, enfocado en la producción de hidrógeno verde en este país.

Referencias

- [1] P. de las N. U. para el M. A. PNUMA, “Movilidad eléctrica: Avances en América Latina y el Caribe,” 2020.
- [2] Volvo Trucks Global, “FAQ about electric trucks,” 2021. <https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks/alternative-fuels/electric-trucks/faq.html> (accessed Aug. 05, 2021).
- [3] Smart Freight Centre, “Low Emission Fuels and Vehicles for Road Freight,” no. October, 2020.
- [4] Naciones Unidas, “Qué es la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático | CMNUCC,” 2022. <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-convention/que-es-la-convencion-marco-de-las-naciones-unidas-sobre-el-cambio-climatico> (accessed Mar. 22, 2021).
- [5] N. Unidas, “The Paris Agreement | UNFCCC,” 2022. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement> (accessed Mar. 22, 2021).
- [6] Ministerio de Ambiente, “Uruguay en las negociaciones internacionales de cambio climático,” 2020. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/institucional/informacion-gestion/memorias-anuales/uruguay-negociaciones-internacionales-cambio-climatico> (accessed Mar. 22, 2021).
- [7] SNRCC, “Visualizador De Avances De La Contribución Determinada a Nivel Nacional.” https://visualizador.gobiernoabierto.gub.uy/visualizador/api/repos/%3Apublic%3Aorganismos%3Ambiente%3Avisualizador_cdn.wcdf/generatedContent (accessed Aug. 13, 2021).
- [8] Portal Movilidad, “Movilidad eléctrica en Uruguay - Especiales Portal Movilidad - YouTube,” Feb. 24, 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=WhjkqIVSmGs&t=5197s> (accessed Mar. 22, 2021).
- [9] M. de Ambiente, “Estrategia de Largo Plazo de Uruguay para un Desarrollo Bajo en Emisiones y Resiliente al Clima.” <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/estrategia-largo-plazo-uruguay-para-desarrollo-bajo-emisiones-resiliente-clima> (accessed Mar. 22, 2021).
- [10] UNFCCC, “Communication of long-term strategies.” <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/long-term-strategies> (accessed Mar. 22, 2021).
- [11] MIEM, “Monitor Energético,” 2021. [https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/documentos/publicaciones/Monitor Energético Año I N°9 Noviembre.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/documentos/publicaciones/Monitor%20Energ%C3%A9tico%20A%C3%B1o%20I%20N%C2%BA9%20Noviembre.pdf) (accessed Jan. 24, 2022).

- [12] G. Krishna, “Understanding and identifying barriers to electric vehicle adoption through thematic analysis,” *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.*, vol. 10, p. 100364, 2021, doi: 10.1016/j.trip.2021.100364.
- [13] IEA International Energy Agency, “Global EV Outlook 2021 Accelerating ambitions despite the pandemic,” Paris, 2021. Accessed: May 10, 2021. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>.
- [14] MIEM, “Balance Energético 2020,” 2020.
- [15] Shell and Deloitte, “Decarbonising Road Freight : GETTING INTO GEAR,” 2021.
- [16] B. Nykvist and O. Olsson, “The feasibility of heavy battery electric trucks,” *Joule*, pp. 901–913, 2021, doi: 10.1016/j.joule.2021.03.007.
- [17] ONU Medio Ambiente, “Movilidad eléctrica: Avances en América Latina y El Caribe y Oportunidades para la Colaboración Regional,” 2018. Accessed: Mar. 19, 2021. [Online]. Available: <https://www.miem.gub.uy/energia/movilidad-electrica>.
- [18] El País, “Un año muy particular para el sector eléctrico en Uruguay,” 2022. <https://www.elpais.com.uy/economia-y-mercado/ano-particular-sector-electrico-uruguay.html> (accessed Feb. 04, 2022).
- [19] Proyecto MOVÉS, “Proyecto MOVÉS - el proyecto,” 2021. <https://moves.gub.uy/el-proyecto/> (accessed Sep. 15, 2021).
- [20] Freightliner Trucks, “Beyond The Batteries: How Electric Trucks Work,” 2021. <https://freightliner.com/blog-and-newsletters/beyond-the-batteries-how-electric-trucks-work/> (accessed Aug. 18, 2021).
- [21] J. A. Sanguesa, V. Torres-Sanz, P. Garrido, F. J. Martinez, and J. M. Marquez-Barja, “A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges,” *Smart Cities*, vol. 4, no. 1, pp. 372–404, 2021, doi: 10.3390/smartcities4010022.
- [22] IEA International Energy Agency, “The Future of Trucks – Implications for Energy and the Environment,” *Int. Energy Agency*, 2017.
- [23] K. Hampshire, R. German, A. Pridmore, and J. Fons, *Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives*, no. 13. 2018.
- [24] H. Basma, Y. Beys, and F. Rodríguez, “Battery electric tractor-trailers in the European Union: A vehicle technology analysis,” 2021. [Online]. Available: www.theicct.org.
- [25] Forbes, “Cheap Batteries Could Soon Make Electric Freight Trucks 50% Cheaper To Own Than Diesel,” 2021. <https://www.forbes.com/sites/energyinnovation/2021/03/16/plummeting-battery-prices-mean-electric-freight-trucks-could-be-50-cheaper-to-own-than-diesel/?sh=2b711f14418c> (accessed Oct. 27, 2021).

- [26] H. Li and C. Chen, "Research on Residual Value Evaluation of Battery Electric Vehicles Based on Replacement Cost Method," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 461, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/461/1/012027.
- [27] Geotab, "What can 6,000 electric vehicles tell us about EV battery health?," 2020. <https://www.geotab.com/blog/ev-battery-health/> (accessed Jan. 08, 2022).
- [28] M. H. S. M. Haram, J. W. Lee, G. Ramasamy, E. E. Ngu, S. P. Thiagarajah, and Y. H. Lee, "Feasibility of utilising second life EV batteries: Applications, lifespan, economics, environmental impact, assessment, and challenges," *Alexandria Eng. J.*, vol. 60, no. 5, pp. 4517–4536, 2021, doi: 10.1016/j.aej.2021.03.021.
- [29] UNIT-IEC, "UNIT-IEC 61851-1:2017." 2017.
- [30] D. Hall and N. Lutsey, "Estimating the infrastructure needs and costs for the launch of zero-emission trucks," *Int. Counc. Clean Transp.*, no. August, pp. 1–31, 2019, [Online]. Available: https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EV_HDVs_Infrastructure_20190809.pdf.
- [31] Movilidad Eléctrica UTE, "Carga de vehículos," 2021. <https://movilidad.ute.com.uy/carga.html> (accessed Mar. 19, 2021).
- [32] European Commission, "Electrification of the Transport System: Studies and Reports," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 10, no. 6, pp. 1–49, 2017.
- [33] D. Welch, C. Façanha, R. Kroon, D. Bruil, F. Jousma, and H. Weken, "Moving Zero-Emission Freight Toward Commercialization," Aug. 2020. Accessed: Mar. 19, 2021. [Online]. Available: www.globaldrivetozero.org.
- [34] RMI, "One Size Doesn't Fit All: How Commercial Electric Vehicles Present Unique Challenges for Charging Infrastructure," 2019. <https://rmi.org/one-size-doesnt-fit-all/> (accessed Mar. 19, 2021).
- [35] Portal Movilidad, "País por país, los números del 2021 en infraestructura de carga para vehículos eléctricos en Latinoamérica," 2021. <https://portalmovilidad.com/pais-por-pais-los-numeros-del-2021-en-infraestructura-de-carga-para-vehiculos-electricos-en-latinoamerica/> (accessed Jan. 09, 2022).
- [36] M. Helmbrecht, C. Olaverri-Monreal, K. Bengler, R. Vilimek, and A. Keinath, "How electric vehicles affect driving behavioral patterns," *IEEE Intell. Transp. Syst. Mag.*, vol. 6, no. 3, pp. 22–32, 2014, doi: 10.1109/MITS.2014.2315758.
- [37] NACFE, "Run On Less: Maintenance, Training & Safety," Jun. 29, 2021. <https://runonless.com/bootcamp/maintenance-training-safety/> (accessed Dec. 04, 2021).
- [38] B. University, "BU-401: How do Battery Chargers Work? - Battery University," Oct. 25,

2021. <https://batteryuniversity.com/article/bu-401-how-do-battery-chargers-work> (accessed Dec. 29, 2021).
- [39] B. Ślusarczyk, “Electromobility for sustainable transport in Poland,” *Energy Transform. Towar. Sustain.*, pp. 199–218, 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-817688-7.00010-0.
- [40] Scania, “How does a hydrogen fuel cell electric truck work?,” 2020. <https://www.scania.com/group/en/home/newsroom/news/2020/how-does-a-hydrogen-fuel-cell-electric-truck-work.html> (accessed Aug. 18, 2021).
- [41] Deloitte China and Ballard, “Fueling the Future of Mobility Hydrogen and fuel cell solutions for transportation,” *Financ. Advis.*, vol. 1, p. Volume 1, 2019.
- [42] CHBC, “CHBC Hydrogen FAQ,” pp. 1–16, 2018, [Online]. Available: <https://www.californiahydrogen.org/wp-content/uploads/2017/10/Hydrogen-FAQ-1.pdf>.
- [43] NACFE, “Making Sense of Heavy-Duty Hydrogen Fuel,” 2020.
- [44] D. of P. I. and R. Development, “Frequently Asked Questions Renewable Hydrogen.”
- [45] MIEM, “Proyecto piloto H2U,” 2021. <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/noticias/uruguay-lanza-proyecto-piloto-h2u-para-avanzar-hacia-produccion-hidrogeno> (accessed Dec. 09, 2021).
- [46] IEA International Energy Agency, “Global Hydrogen Review 2021,” 2021. doi: 10.1787/39351842-en.
- [47] H2Haul, “Hydrogen Infrastructure – H2Haul,” 2020. <https://www.h2haul.eu/hydrogen-infrastructure/> (accessed Jan. 11, 2022).
- [48] Energy Efficiency & Renewable Energy, “Hydrogen Delivery | Department of Energy,” 2021. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-delivery> (accessed Jan. 11, 2022).
- [49] H2.live, “Hydrogen stations: FAQ,” 2021. <https://h2.live/en/faq/> (accessed Dec. 09, 2021).
- [50] C. Cunanan, M.-K. Tran, Y. Lee, S. Kwok, V. Leung, and M. Fowler, “A Review of Heavy-Duty Vehicle Powertrain Technologies: Diesel Engine Vehicles, Battery Electric Vehicles, and Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles,” *Clean Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 474–489, 2021, doi: 10.3390/cleantechnol3020028.
- [51] Proyecto MOVÉS, “Ecosistema para la Promoción de la Movilidad Sostenible en empresas - Proyecto MOVÉS,” 2021. <https://moves.gub.uy/iniciativa/ecosistema-para-la-promocion-de-la-movilidad-sostenible-en-empresas/> (accessed Dec. 28, 2021).
- [52] MEF, *Artículo 35 Decreto N96/990*. 2021.
- [53] DNE, “DNE - Eficiencia Energetica - Instrumentos para la promoción de la movilidad eléctrica - Transporte,” 2021. http://www.eficienciaenergetica.gub.uy/transporte?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_col_id=column-

1&p_p_col_count=1&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_assetEntryId=4483635&_101_type=content&_101_urlTitle=instrumento (accessed Jan. 26, 2022).

- [54] L. Fridstrøm, “The norwegian vehicle electrification policy and its implicit price of carbon,” *Sustain.*, vol. 13, no. 3, pp. 1–14, 2021, doi: 10.3390/su13031346.
- [55] National Conference of State Legislatures, “State Policies Promoting Hybrid and Electric Vehicles,” 2021. <https://www.ncsl.org/research/energy/state-electric-vehicle-incentives-state-chart.aspx> (accessed Mar. 19, 2021).
- [56] MIEM, “Impulsando la economía del hidrógeno verde | Ministerio de Industria, Energía y Minería,” 2021. <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/politicas-y-gestion/impulsando-economia-del-hidrogeno-verde> (accessed Jan. 10, 2022).
- [57] Electromovilidad, “Conectores para la recarga del vehículo eléctrico - Electromovilidad,” 2022. <http://electromovilidad.net/conectores-para-la-recarga-del-vehiculo-electrico/> (accessed Jan. 09, 2022).

Centro de Innovación en Organización Industrial (CINOI)

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

cinoi@um.edu.uy

