



CM-DEMA-2023-091

**Producto 2. BENCHMARKING PARA EL ESTUDIO
DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE RECARGA DE
AUTOBUSES ELÉCTRICOS**

SERVICIOS DE APOYO A LOS PODERES PÚBLICOS DE LA
REPÚBLICA DOMINICANA EN LA ELABORACIÓN DEL ESTUDIO
SOBRE EL ESTABLECIMIENTO DE ALTERNATIVAS DE CARGA
PARA MOVILIDAD ELÉCTRICA, EN EL MARCO DEL PROYECTO
“PARTICIPACIÓN DE LA REPÚBLICA DOMINICANA EN
EUROCLIMA”

19 de diciembre de 2023

Dr. Angel López

Ing. Joan Artigas

ELECTRA MOBILITY SERVICES, S.L.



Financiado por
la Unión Europea



FIIAPP
COOPERACIÓN ESPAÑOLA



PRESENCIA DE LA
REPÚBLICA DOMINICANA
**Consejo Nacional
para el Cambio Climático**



INTRANT
INSTITUTO NACIONAL DE TRÁNSITO
Y TRANSPORTE TERRESTRE

Este informe se ha elaborado para el [Programa EUROCLIMA](#) de la Unión Europea, a solicitud de la Fundación Internacional y para Iberoamérica de Administración y Políticas Públicas.

Reproducción autorizada siempre que se cite la fuente.

“La presente publicación ha sido elaborada con la asistencia de la Unión Europea. El contenido de ésta es responsabilidad exclusiva de los autores y en ningún caso se debe considerar que refleje la opinión de la Unión Europea”.



TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN AL BENCHMARKING	4
2. RECARGAR NOCTURNA “OVERNIGHT” (CONDUCTIVA)	5
3. SWAP DE BATERÍAS.....	10
4. CARGA DIURNA EN RUTA “OPORTUNIDAD” (CONDUCTIVA)	14
5. MODELO DE PILA DE COMBUSTIBLE “HIDRÓGENO”	23
6. OTRAS ALTERNATIVAS DE RECARGA	27
6. CONCLUSIÓN	29



1. INTRODUCCIÓN AL BENCHMARKING

Este documento tiene como finalidad realizar un análisis comparativo detallado de las distintas opciones de recarga disponibles y compatibles con el servicio de transporte público de autobuses de República Dominicana. A continuación, se presentarán y examinarán minuciosamente diversas alternativas de recarga, enfocándonos en los aspectos más relevantes de cada una para facilitar una evaluación exhaustiva. Para una mejor comprensión y análisis sistemático, los elementos clave de cada opción serán desglosados y explicados en la siguiente tabla resumen, permitiendo así una comparación clara y estructurada entre las diferentes alternativas.

Apartado	Descripción
Identificación de Tecnologías	Lista de las tecnologías a estudiar: Recarga rápida, recarga lenta, recarga inductiva, swap de baterías, puntos de recarga alimentados por energía renovable, y carga mediante hidrógeno.
Capacidad y Velocidad de Recarga	Datos sobre la cantidad de energía que cada tecnología puede transferir en un tiempo dado y cuánto tiempo toma recargar completamente un autobús.
Costos Iniciales y Operativos	Análisis de los costos de instalación, mantenimiento y operación de cada tecnología. Esto incluye el costo del equipo, la infraestructura necesaria y la energía consumida durante la vida útil del sistema.
Eficiencia Energética	Evaluación de la eficiencia energética de cada tecnología, incluyendo pérdidas durante la recarga y la relación entre la energía suministrada y la energía utilizada efectivamente por el autobús.
Compatibilidad con la situación actual de República Dominicana del servicio de transporte público y la red de distribución	Evaluación de la compatibilidad con la situación actual de República Dominicana, tanto técnicamente como políticamente y legal.
Fiabilidad y Durabilidad	Evaluación de la fiabilidad a largo plazo y la vida útil de los sistemas de recarga, basada en datos de rendimiento y mantenimiento.
Casos de Estudio y Uso Actual, Complejidad y Futuro y Tendencias	Resumen de cómo se están implementando actualmente estas tecnologías en diferentes ciudades o sistemas de transporte, incluyendo desafíos enfrentados y soluciones adoptadas. Discusión sobre las tendencias emergentes, innovaciones en desarrollo y el potencial futuro de cada tecnología en el contexto de la electrificación del transporte. Discusión sobre innovaciones en desarrollo y el potencial futuro de cada tecnología en el contexto de la electrificación del transporte.
Infraestructura y Escalabilidad	Análisis de la infraestructura necesaria para implementar cada tecnología y su capacidad para escalar a medida que crece la flota de autobuses eléctricos.



Apartado	Descripción
Sostenibilidad y Medio Ambiente	Estudio del impacto ambiental de cada tecnología, incluyendo emisiones reducidas, origen de la energía (especialmente si es renovable) y ciclo de vida de los componentes (como baterías).

2. RECARGAR NOCTURNA “OVERNIGHT” (CONDUCTIVA)

Identificación de tecnologías

Este modelo de recarga es el más utilizado para la carga de autobuses tras la finalización de su servicio. Se trata de una recarga nocturna que se lleva a cabo usualmente en el lugar en el que "duermen" los autobuses, la cochera o módulos para el caso de estudio. El objetivo es aprovechar todo el tiempo posible para cargar el autobús con la suficiente energía para que pueda cumplir con el servicio diario y con la menor potencia posible. Esto supone que la batería sea tratada con mayor cuidado y pueda garantizar una mayor durabilidad que en el caso contrario de una carga ultra-rápida. Adicionalmente, se trata de un modelo que usualmente permite una mayor flexibilidad en los horarios de los autobuses dado el amplio margen de tiempo de recarga.

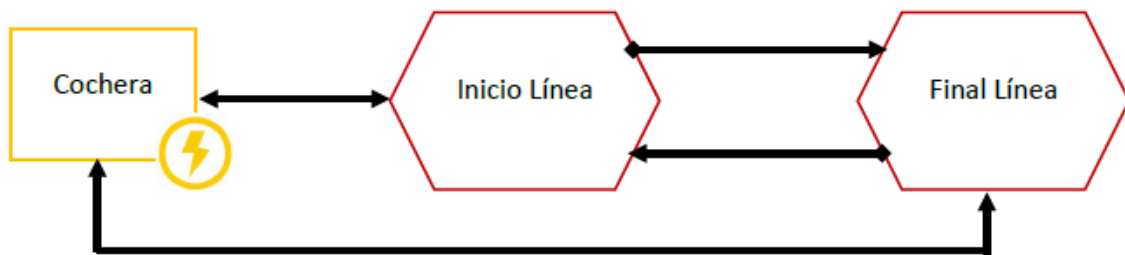


FIGURA 1. CARGA LENTA NOCTURNA “OVERNIGHT”.

Capacidad y velocidad de recarga

Basándose en los datos disponibles, se ha observado que los autobuses suelen operar durante aproximadamente 18 horas al día, reservando las 6 horas restantes para periodos de descanso. Se presume que, incluso considerando el tiempo necesario para el mantenimiento de los vehículos, estas 6 horas pueden emplearse eficientemente para la recarga de los autobuses. Sin embargo, la demanda energética varía dependiendo del consumo de energía específico de los autobuses en cada ruta. A continuación, se presentan dos casos contemplados:



- En el primer caso, partiendo de los datos disponibles de la tabla de datos aportados como referencia por el Instituto Nacional de Tránsito y Transporte Terrestre (INTRANT), que se asemejan al recorrido (trayecto) de un módulo a otro, y basándose en un estimado conservador de los datos disponibles, se asume un consumo promedio de 350 kWh por día. Con las 6 horas disponibles para la recarga, se requeriría una potencia mínima por punto de recarga de 58,3 kW. Dado que el mercado no ofrece puntos de recarga específicamente de 58,3 kW, se consideraría el modelo más común de 75 kW por punto de recarga (PdR). Esto ofrecería una mayor flexibilidad en el horario de carga, permitiendo completar la recarga en aproximadamente 4,7 horas en lugar de las 6 completas.
- En el segundo caso, partiendo de los datos disponibles de los archivos “KMZ” de datos aportados como referencia por el Instituto Nacional de Tránsito y Transporte Terrestre (INTRANT), que se asemejan en algunos casos al recorrido de un trayecto de módulo a módulo y módulo a módulo, y asumiendo un consumo estimado más alto de 600 kWh por día, se necesitaría una potencia mínima por punto de recarga de 100 kW. Para mantener una flexibilidad similar en el horario de recarga, sería aconsejable optar por equipos de recarga de mayor capacidad, como los de 120 o 150 kW.

Es importante destacar que, en la mayoría de los casos, la potencia de salida de los equipos de recarga puede ajustarse. Por ejemplo, un equipo con una capacidad máxima de 150 kW podría limitarse para proporcionar solo 130 kW si así se requiere.

Costes iniciales y operativos

En cuanto a los costos asociados con esta modalidad de recarga, se distribuirían principalmente de la siguiente manera:

- Costes de infraestructura de recarga: Incluyen los puntos de recarga por autobús, la conexión eléctrica a la red de distribución, al sistema de almacenamiento o a la planta de generación, si aplica, entre otros aspectos relevantes.
- Costes de la planta de generación (si aplica): Al considerar la posibilidad de una planta de generación propia, como una fotovoltaica, se incurre en un costo adicional significativo. En situaciones donde los patios no están cubiertos, como en el caso de estudio, se debe considerar el costo adicional de estructuras o cubiertas apropiadas.
- Costes de la energía consumida de la red de distribución: En situaciones donde no se dispone de un sistema de almacenamiento y la planta de generación no pueda generar energía debido a condiciones, por ejemplo, climáticas, es crucial considerar el costo de la energía consumida desde la red de distribución.
- Coste del sistema de almacenamiento (si aplica): Para casos como una planta fotovoltaica donde la energía se genera durante el día pero la carga se realiza por la noche (overnight), es necesario un sistema de almacenamiento para retener la energía generada y usarla posteriormente.
- Costes asociados al mantenimiento y operación: La implementación de este sistema



requiere un mantenimiento adecuado para asegurar la continuidad del servicio. Esto incluye tanto mantenimiento preventivo (realizado periódicamente, mensual y anualmente) como mantenimiento correctivo para atender cualquier incidencia de manera inmediata. Además, la operación del sistema conlleva costos adicionales debido a la necesidad de recursos materiales y humanos para la gestión del servicio, como la atención telefónica por incidencias, plataformas de gestión, formación, entre otros.

Este desglose proporciona una visión integral de los costos involucrados en la implementación y operación de sistemas de recarga para autobuses, permitiendo una planificación y gestión más efectiva de los recursos.

Eficiencia energética

La eficiencia energética de la carga lenta en patios (Overnight) con generación fotovoltaica y almacenamiento en baterías se evalúa en función de la capacidad de maximizar el uso de energía renovable generada y minimizar las pérdidas energéticas en todo el proceso. Esta modalidad presenta varias ventajas en términos de eficiencia:

- Generación Fotovoltaica durante el día: Al generar energía durante las horas de máxima irradiación solar, se aprovecha la energía renovable de manera óptima. La eficiencia de conversión de los paneles fotovoltaicos, que típicamente ronda el 15-20%, es un factor crucial en la cantidad de energía que se puede almacenar.
- Almacenamiento en baterías: La energía generada se almacena en sistemas de baterías, lo que permite su uso durante la noche cuando los vehículos están inactivos. La eficiencia de estos sistemas de almacenamiento, que puede variar del 85% al 95%, es fundamental para determinar la cantidad de energía disponible para la recarga.
- Pérdidas en la recarga: Durante la recarga nocturna, se deben considerar las pérdidas inherentes al proceso de conversión de energía y transferencia a los autobuses. Las eficiencias de los cargadores pueden afectar significativamente la cantidad de energía que los autobuses reciben. Los cargadores modernos tienen eficiencias que pueden superar el 90%.
- Conexión a la Red de Distribución para emergencias: Aunque la modalidad está diseñada para ser autosuficiente la mayoría del tiempo, la conexión a la red de distribución garantiza la continuidad del servicio ante situaciones imprevistas. La eficiencia de este respaldo dependerá de la infraestructura de la red y de las eficiencias operativas de la misma.
- En conjunto, la eficiencia energética de este sistema se ve afectada positivamente por el uso de energía renovable y sistemas de almacenamiento eficientes, y negativamente por las pérdidas en la conversión y transferencia de energía.

Cabe destacar, sin embargo, que el paso de un sistema de combustión en el que los autobuses trabajan sobre una eficiente energética aproximada del 30%, a un sistema eléctrico, logrando una eficiencia aproximada del 95%, en una comparación de motores, ya



es un logro importante.

Compatibilidad con la situación actual de República Dominicana del servicio de transporte público y la red de distribución

La recarga lenta requiere una revisión y potencial consolidación de las terminales de autobuses para garantizar espacio suficiente para la infraestructura de recarga, lo cual puede implicar la reordenación de las líneas de autobuses que actualmente terminan su ruta en lugares sin el espacio necesario.

Es aconsejable centralizar las instalaciones de recarga para manejar eficientemente las flotas y reducir la dispersión de puntos de recarga, favoreciendo la agrupación de 120-150 autobuses por cochera.

La carga lenta podría verse afectada por la variabilidad de la generación fotovoltaica debido al clima u otros factores. Sería esencial que las operadoras se registren como generadores y almacenadores de energía renovable, con contratos que les permitan manejar la volatilidad en la generación y proporcionar almacenamiento de energía a la red de CUED (Consejo Unificado de las Empresas Distribuidoras de Electricidad).

Aunque la carga lenta es menos flexible debido a la duración de la recarga, la planificación operativa debe considerar la capacidad de carga durante las horas nocturnas, cuando los autobuses están fuera de servicio.

Fiabilidad y Durabilidad

La carga lenta en cocheras es una modalidad que favorece la longevidad de los componentes eléctricos, incluyendo los autobuses eléctricos y sus baterías. Los sistemas eléctricos fijos como cuadros y armarios eléctricos suelen tener una vida útil de más de 20 años. Los equipos de recarga tienen garantías de alrededor de 15 años, aunque se recomienda renovar componentes más frecuentemente debido al rápido avance tecnológico y a consideraciones estéticas. En el caso de autobuses eléctricos, se considera que, tras 10 años, el vehículo retiene solo el 10% de su valor inicial, y comúnmente se realiza un cambio de batería a la mitad de la vida útil del autobús. La carga lenta implica una degradación menos acelerada de la batería, lo cual puede extender su periodo antes de la renovación.

Casos de estudio y uso actual, complejidad y futuro y tendencias

La carga lenta en cocheras es altamente sostenible, especialmente cuando se combina con generación fotovoltaica y almacenamiento de energía. Este sistema permite un uso eficiente de energía renovable, minimizando el impacto ambiental. La producción de infraestructura y baterías implica cierta huella de carbono, pero con prácticas de reciclaje y una cadena de suministro sostenible, este impacto puede ser mitigado. Dada la creciente transición hacia energías renovables en la red de distribución europea, la carga nocturna se alinea con los objetivos de reducción de emisiones y fomenta una mayor integración de las energías limpias en el transporte público.



Sostenibilidad y medio ambiente

Sostenibilidad y Medio Ambiente para la Carga Lenta en Cocheras (Overnight)

- Reducción de emisiones: La combinación de generación fotovoltaica y recarga nocturna maximiza el uso de energía renovable, reduciendo significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la generación de energía.
- Impacto de la producción y reciclaje de baterías: Aunque la operación del sistema es sostenible, la fabricación y el reciclaje final de las baterías de los autobuses y del sistema de almacenamiento implican cierto impacto ambiental que debe ser gestionado a través de prácticas de economía circular.
- Uso de infraestructura existente: La utilización de la infraestructura de recarga existente durante la noche ayuda a optimizar los recursos ya disponibles y minimizar la necesidad de construcciones adicionales, lo cual tiene un impacto positivo en la huella ambiental.

La dependencia de energía renovable de la red de distribución complementa la sostenibilidad de los sistemas, permitiendo que incluso en situaciones de emergencia, el impacto ambiental se mantenga reducido.



3. SWAP DE BATERÍAS

Identificación de tecnologías

El swap o, mejor dicho, el intercambio de baterías de vehículos eléctricos se basa en el empleo de estaciones que incorporan un sistema automatizado para extraer la batería de un autobús y sustituirla por una batería completa. Para conseguirlo, se requiere de vehículos que hayan sido diseñados para poder extraer e intercambiar sus packs de baterías rápidamente, con un sistema automatizado y, por supuesto, de las estaciones que sean capaces de realizar esta operación con seguridad y en un tiempo razonable



FIGURA 2 ESTACIÓN DE INTERCAMBIO PARA BATERÍAS DE SILENCE (BATTERY SWAP). FUENTE: MOVILIDAD ELECTRICA.COM

Capacidad y velocidad de recarga

El tiempo que tarda en cambiarse una batería en una estación de swap, por otra completamente cargada, es inferior a los 5 minutos.

Costes iniciales y operativos

Los costos iniciales en un sistema de "swap" de baterías son significativos, pues incluyen la infraestructura necesaria para el almacenamiento y manejo de múltiples baterías, así como las estaciones de intercambio. La inversión en equipos especializados para el intercambio rápido de baterías también es considerable. Operativamente, el modelo de "swap" requiere una logística avanzada y personal capacitado para gestionar el proceso de intercambio de baterías, lo que conlleva costos continuos de formación y mantenimiento. A largo plazo, los costos operativos incluyen el reemplazo frecuente de baterías, que puede ser más alto que en sistemas de carga directa debido a la degradación acelerada por el uso intensivo. Además, los avances tecnológicos pueden requerir actualizaciones del sistema antes de lo previsto, para mantener la compatibilidad con las nuevas generaciones de baterías y autobuses eléctricos. El recubrimiento de los equipos y la renovación tecnológica periódica implican que los costos de mantenimiento y actualización sean una consideración importante en el



modelo financiero de estas operaciones.

Eficiencia energética

En el caso de un sistema de "swap" de baterías combinado con generación fotovoltaica (PFV) y conexión a la red de distribución para emergencias, la eficiencia energética se evaluaría así:

- Eficiencia de paneles fotovoltaicos: Los paneles fotovoltaicos modernos suelen tener una eficiencia de conversión de energía de alrededor del 15-20%. Sin embargo, los paneles de alta eficiencia pueden alcanzar valores cercanos al 22-25%.
- Eficiencia del proceso de swap: La eficiencia operativa del proceso de intercambio de baterías puede ser bastante alta, ya que elimina la necesidad de tiempo de carga activo del vehículo. La operación de swap podría llevarse a cabo con una eficiencia del proceso cercana al 95%, si se considera únicamente el tiempo y la energía involucrados en el intercambio físico de las baterías.
- Ausencia de almacenamiento intermedio: La eliminación del almacenamiento intermedio puede reducir las pérdidas asociadas con la conversión de energía, que podrían ser de aproximadamente un 5-10% en sistemas de almacenamiento de baterías tradicionales.
- Eficiencia de la Red para emergencias: Cuando se requiere energía de la red, se podrían esperar eficiencias típicas de la infraestructura de red, que varían ampliamente pero generalmente están por encima del 90% para la transmisión y distribución.

Resumiendo, un sistema de "swap" de baterías con generación fotovoltaica elimina las pérdidas de eficiencia asociadas con el almacenamiento intermedio y las conversiones adicionales de energía. La eficiencia combinada de la generación fotovoltaica y el proceso de swap podría estar en el rango del 80-85% considerando todas las etapas, desde la generación hasta el uso efectivo en el autobús, mientras que la conexión a la red de distribución para emergencias mantendría una eficiencia alta siempre que se necesite recurrir a ella.

Compatibilidad con la situación actual de República Dominicana del servicio de transporte público y la red de distribución

En este caso se presentarían las siguientes relaciones con el estado actual de República Dominicana:

- Ahorro de espacio: El modelo de "swap" de baterías elimina la necesidad de espacio dedicado a infraestructura de recarga fija, lo que es especialmente beneficioso para terminales con espacio limitado o corredores cuyos vehículos duermen en módulos en la vía pública.
- Interacción con la CUED (Consejo Unificado de las Empresas Distribuidoras de Electricidad): Dado que la CUED prefiere instalaciones de almacenamiento en lugar



de generación fotovoltaica propia, el "swap" de baterías es ideal, ya que permite cargar las baterías durante el día con energía renovable y utilizarlas para el servicio de autobuses, sin la necesidad de invertir en infraestructura fotovoltaica adicional.

- Velocidad de recarga y flexibilidad operativa: La capacidad de intercambiar baterías rápidamente hace que el "swap" sea una opción más adaptable a la volatilidad y flexibilidad del servicio de transporte público de República Dominicana, ofreciendo un proceso de recarga más veloz y eficiente en comparación con la carga lenta.

Fiabilidad y Durabilidad

El sistema de "swap" de baterías, aún no ampliamente adoptado en Europa, implica una logística más compleja en cuanto a la fiabilidad y durabilidad. Aunque los componentes eléctricos pueden tener una vida útil larga, la frecuencia de intercambio de las baterías puede acelerar su desgaste. Los autobuses eléctricos pueden requerir cambios de batería más frecuentes, especialmente si cada autobús opera con múltiples baterías. La vida útil de las baterías en un sistema de "swap" podría verse reducida debido a la manipulación constante, y se esperaría que, tras 8 años, proporcionen alrededor del 80% de su capacidad inicial. Esto podría implicar costos adicionales a largo plazo en términos de renovación y mantenimiento de baterías.

Casos de estudio y uso actual, complejidad y futuro y tendencias

El sistema de "swap" de baterías, aunque menos extendido en Europa, presenta un enfoque innovador para la sostenibilidad en el transporte eléctrico. En Asia, donde la implementación es más avanzada, se ha demostrado que el "swap" puede reducir significativamente los tiempos de inactividad y optimizar la utilización de las baterías. Como ejemplo de casos de estudio o de herramientas que permitan buscarlos, se encuentran, entre otras, las siguientes:

- WBSEDCL 205 EV Charging / Battery Swapping Station Tender: En la India, la West Bengal State Electricity Distribution Company Limited (WBSEDCL) invitó a presentar ofertas para instalar 205 estaciones de carga de vehículos eléctricos y estaciones de intercambio de baterías. Esta licitación incluye el diseño, la ingeniería, la fabricación/adquisición, el suministro, la instalación, las pruebas y la puesta en marcha, incluyendo la obligación de garantía de la operación y mantenimiento integral.
- TenderDetail - Battery Swapping Station Tenders in India: En esta plataforma, se pueden encontrar 87 licitaciones para estaciones de intercambio de baterías en India para el año 2024. Estas licitaciones son publicadas por varios departamentos gubernamentales y empresas privadas. La plataforma proporciona detalles como la fecha de cierre, el valor de la licitación y enlaces para ver los avisos completos.

Sin embargo, la sostenibilidad de este modelo depende del ciclo de vida de las baterías y de la eficiencia en el proceso de intercambio. La logística de las baterías "swappable" debe gestionarse cuidadosamente para evitar impactos ambientales negativos, como la sobreproducción y el desecho inadecuado. Con las regulaciones adecuadas y la adopción de



estándares de reciclaje, el modelo de "swap" tiene el potencial de ofrecer una solución eficiente y sostenible para la movilidad urbana.

Infraestructura y escalabilidad

Conlleva un alto coste en lo que supone la disponibilidad de las baterías y su almacenamiento y la mano de obra que implica realizar estos cambios y en tan poco tiempo.

Además, el sistema debe disponer del espacio adecuado para la carga de las baterías, siempre se aconseja en períodos de tiempo donde el coste de la electricidad sea menor y, por tanto, poder cargar gran volumen de baterías al mismo tiempo para su posterior disponibilidad.

Sostenibilidad y medio ambiente

En este caso se presentarían las siguientes relaciones en cuanto a al sostenibilidad y medio ambiente:

- Eficiencia en el uso de recursos: El sistema de "swap" de baterías elimina la necesidad de infraestructura de recarga y almacenamiento intermedio, lo que puede reducir el uso de materiales y la energía incorporada en estos sistemas.
- Gestión de baterías: La gestión eficiente de las baterías intercambiables es clave para la sostenibilidad, ya que promueve la reutilización y el reciclaje adecuado, extendiendo la vida útil de las baterías y reduciendo la demanda de recursos para nuevas baterías.
- Adaptabilidad a la energía renovable: Al cargar directamente las baterías con energía fotovoltaica, este sistema se adapta bien a la incorporación de energías renovables, lo cual alinea con los objetivos de sostenibilidad y transición energética.

La dependencia de energía renovable de la red de distribución complementa la sostenibilidad de los sistemas, permitiendo que incluso en situaciones de emergencia, el impacto ambiental se mantenga reducido.



4. CARGA DIURNA EN RUTA “OPORTUNIDAD” (CONDUCTIVA)

Identificación de tecnologías

Los sistemas de carga rápida con un rango de potencias de entre 300 kW y 600 kW están recomendados para los casos en que el vehículo no tiene autonomía suficiente para completar la jornada y necesita hacer cargas rápidas durante el recorrido.

Las estaciones de carga para este tipo de cargadores de oportunidad se colocan en puntos estratégicos de las ciudades. Esto permite cargar varios autobuses o líneas. Normalmente, se aprovechan los tiempos de parada al final/comienzo de línea para cargar en minutos hasta el 85% de la batería.

En nuestro caso, se pueden instalar en los patios que forman parte de las rutas durante la jornada.

La conexión de los cargadores rápidos a pantógrafo up/down permite adecuar las instalaciones y las líneas de autobús a las necesidades

Esta opción ofrece una serie de ventajas como la automatización de la carga, ahorro de espacio y consumos del vehículo o versatilidad en el proceso de carga, por ejemplo.



FIGURA 3. PANTÓGRAFO UTILIZADO EN CIUDAD DE MORITZ, SUIZA. FUENTE: PLATAFORMA DE LA ELECTROMOVILIDAD, MINISTERIO DE ENERGÍA DE SANTIAGO DE CHILE.

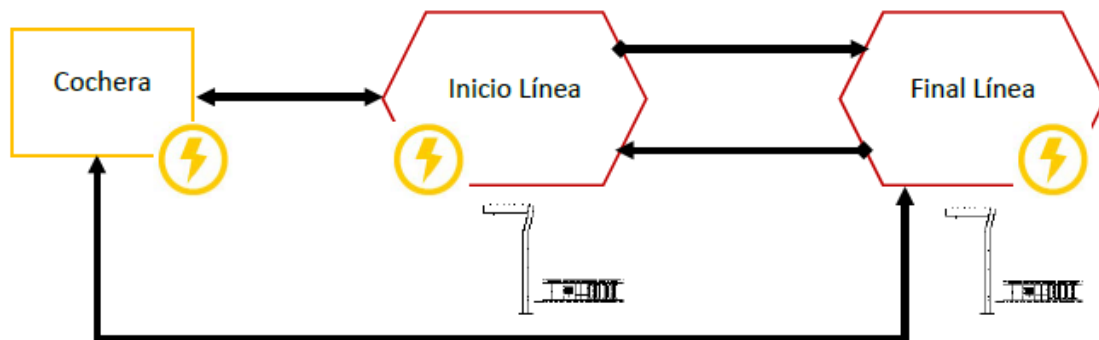


FIGURA 4. CARGA LENTA DIURNA "OPORTUNIDAD".

Capacidad y velocidad de recarga

Es posible encontrar en la actualidad versiones de carga rápida, dispuestos en las paradas y con tiempos de carga entre 3 a 5 minutos, y de carga lenta, dispuestos en los terminales que cargan las baterías en 30 minutos. Este avance va de la mano con la mejora en las baterías para aceptar ciclos de carga rápida a lo largo de la vida útil del bus y de la oferta de OEMs que desarrollen buses que permitan carga por pantógrafo. Todo lo anterior permite configurar el sistema según el requerimiento del cliente en términos de "hacer a la medida" el bus eléctrico con más o menos capacidad de batería. Sin embargo, la implementación conlleva a recorridos fijos donde se instalen estos pantógrafos, cuyas potencias van de los 150 a 350 (kW), incluso mayores.

Costes iniciales y operativos

En cuanto a los costes asociados con esta modalidad de recarga, se distribuirían principalmente de la siguiente manera:

- Costes de infraestructura de recarga: Incluyen los pantógrafos de recarga por autobús, la conexión eléctrica a la red de distribución, al sistema de almacenamiento o a la planta de generación, si aplica, entre otros aspectos relevantes.
- Costes de la planta de generación (si aplica): Al considerar la posibilidad de una planta de generación propia, como una fotovoltaica, se incurre en un costo adicional significativo. En situaciones donde los patios no están cubiertos, como en el caso de estudio, se debe considerar el costo adicional de estructuras o cubiertas apropiadas.
- Costes de la energía consumida de la Red de Distribución: En situaciones donde no se dispone de un sistema de almacenamiento y la planta de generación no pueda generar energía debido a condiciones, por ejemplo, climáticas, es crucial considerar el coste de la energía consumida desde la red de distribución.
- Además, se debe tener en cuenta la alta potencia necesaria en cada recarga rápida, donde se pueden superar los 400 kW o más.
- Coste del sistema de almacenamiento (si aplica): Para casos como una planta fotovoltaica donde la energía se genera durante el día, pero para días con



condiciones atmosféricas adversas, es necesario un sistema de almacenamiento para retener la energía generada y usarla posteriormente.

- Costes asociados al mantenimiento y operación: La implementación de este sistema requiere un mantenimiento adecuado para asegurar la continuidad del servicio. Esto incluye tanto mantenimiento preventivo (realizado periódicamente, mensual y anualmente) como mantenimiento correctivo para atender cualquier incidencia de manera inmediata. Además, la operación del sistema conlleva costos adicionales debido a la necesidad de recursos materiales y humanos para la gestión del servicio, como la atención telefónica por incidencias, plataformas de gestión, formación, entre otros.

Este desglose proporciona una visión integral de los costos involucrados en la implementación y operación de sistemas de recarga para autobuses, permitiendo una planificación y gestión más efectiva de los recursos.

Eficiencia energética

La eficiencia energética de la carga rápida en patios con generación fotovoltaica y almacenamiento en baterías se evalúa en función de la capacidad de maximizar el uso de energía renovable generada y minimizar las pérdidas energéticas en todo el proceso. Esta modalidad presenta varias ventajas en términos de eficiencia:

- Generación Fotovoltaica durante el día: Al generar energía durante las horas de máxima irradiación solar, se aprovecha la energía renovable de manera óptima. La eficiencia de conversión de los paneles fotovoltaicos, que típicamente ronda el 15-20%, es un factor crucial en la cantidad de energía que se puede almacenar.
- Almacenamiento en baterías: La energía generada se almacena en sistemas de baterías, lo que permite su uso en días nublados o de otra adversidad, pero que a la vez permite dar siempre servicio a la flota con igual eficiencia energética que la que ofrecen las placas directamente.
- Pérdidas en la recarga: menores pérdidas inherentes al proceso de conversión de energía y transferencia a los autobuses que en el caso de overnight, ya que se aprovecha las horas diurnas y la mayor irradiación solar. Las eficiencias de los cargadores pueden afectar significativamente la cantidad de energía que los autobuses reciben. Los cargadores modernos tienen eficiencias que pueden superar el 90%.
- Conexión a la Red de Distribución para emergencias: Aunque la modalidad está diseñada para ser autosuficiente la mayoría del tiempo, la conexión a la red de distribución garantiza la continuidad del servicio ante situaciones imprevistas. La eficiencia de este respaldo dependerá de la infraestructura de la red y de las eficiencias operativas de la misma.

En conjunto, la eficiencia energética de este sistema se ve afectada positivamente por el uso de energía renovable y sistemas de almacenamiento eficientes, y negativamente por las pérdidas en la conversión y transferencia de energía.



Cabe destacar, sin embargo, que el paso de un sistema de combustión en el que los autobuses trabajan sobre una eficiente energética aproximada del 30%, a un sistema eléctrico, logrando una eficiencia aproximada del 95%, en una comparación de motores, ya es un logro importante.

Compatibilidad con la situación actual de República Dominicana del servicio de transporte público y la red de distribución

En este caso se presentarían las siguientes relaciones con el estado actual de República Dominicana:

- Reorganización de espacio: La recarga rápida requiere, en general, una obra civil – eléctrica más compleja, ya que requieren una cantidad de espacio en los patios para ser instalados, lo cual trae otros inconvenientes asociados a permisos, seguridad y aceptación de la sociedad.
- Además, implicar la reordenación de las líneas de autobuses que actualmente terminan su ruta en lugares sin el espacio necesario.
- Centralización de operaciones: Es aconsejable centralizar las instalaciones de recarga para manejar eficientemente las flotas y reducir la dispersión de puntos de recarga, favoreciendo la agrupación de 120-150 autobuses por cochera.
- Contratos de energía y volatilidad de la demanda: La carga rápida podría verse afectada por la variabilidad de la generación fotovoltaica debido al clima u otros factores. Sería esencial que las operadoras se registren como generadores y almacenadores de energía renovable, con contratos que les permitan manejar la volatilidad en la generación y proporcionar almacenamiento de energía a la red de CUED (Consejo Unificado de las Empresas Distribuidoras de Electricidad).
- Flexibilidad del servicio de transporte público: Se debe tener en cuenta la planificación operativa la cual debe considerar la capacidad de carga durante media hora o una hora que puede conllevar la recarga efectiva del autobús y durante ese tiempo que haya otras rutas que cubran los servicios.

Fiabilidad y Durabilidad

La carga rápida conlleva mayor estrés en la vida útil de los componentes eléctricos y baterías, reduciendo considerablemente su periodo de vida antes de la renovación.

Las baterías de iones de litio son la elección predilecta para autobuses eléctricos debido a su alta densidad de energía, eficiencia, bajo mantenimiento y una notable vida útil que puede oscilar entre 8 a 10 años, variando según el mantenimiento y uso. Sin embargo, en caso de una carga ultra-rápida sin un balanceo del voltaje de las celdas de la batería excelente, la vida útil se podría reducir hasta llegar a ser necesario contemplar una sustitución de la batería antes de los 8 años. Estas baterías suelen soportar entre 3.000 y 5.000 ciclos de carga/descarga, con la vida útil específica dependiendo de la tecnología empleada y las condiciones de operación. Un factor crucial para garantizar su duración es el



mantenimiento correcto, apoyado por el uso de un Sistema de Gestión de Baterías (BMS), que asegura una carga segura y eficiente, y monitorea el estado de la batería durante la carga.

Es importante considerar que la vida útil y capacidad de las baterías pueden verse afectadas por variables como la temperatura ambiente, la velocidad de carga y descarga, el patrón de uso del vehículo y la calidad del mantenimiento. Por lo tanto, seguir las recomendaciones del fabricante y realizar un mantenimiento adecuado son pasos esenciales para optimizar el rendimiento y prolongar la vida de la batería.

En cuanto a las especificaciones, se sugiere optar por baterías con una capacidad suficiente para cumplir con el servicio actual, ofreciendo una vida útil mínima de 5 años, con posibilidad de sustitución si no se alcanza esta duración. El término de la vida útil se considera cuando la capacidad disminuye a un rango del 60-80% de su capacidad original. Además, es vital garantizar que la batería pueda cargar a las potencias establecidas y mantener un límite de temperatura interna de trabajo adecuado, por ejemplo, 80°C.

El BMS juega un papel crucial en la gestión de la batería, realizando cargas lentas para un balanceo de tensión adecuado en las celdas y proporcionando protección contra sobrecargas y descargas excesivas. Además, la vida útil de la batería puede optimizarse mediante el uso de potencias bajas de carga/descarga y evitando aceleraciones y frenazos pronunciados en la conducción del vehículo. Los fabricantes aconsejan mantener el SoC (Estado de Carga) de la batería entre el 20% y 80%, evitando los extremos de 0% o 100%, y recomiendan trabajar en rangos de SoC del 50-70% para prolongar la durabilidad.

Como ejemplo comparativo, se podría comparar con la vida útil que se suele considerar para los cargadores de ultra-rápida de 15 años aproximadamente.

Casos de estudio y uso actual, complejidad y futuro y tendencias

Este tipo de cargador aún no tiene presencia masiva para el uso de buses eléctricos. Si bien se ofreció como una tecnología que permite gestionar la autonomía operacional de un bus con menor cantidad de baterías, lo que implica que es un bus con menor costo de inversión y más liviano, la velocidad con que se está avanzando en el desarrollo de baterías más eficientes, de menor peso y costo, ha implicado que los pantógrafos no sean la opción preferida.

Infraestructura y escalabilidad

Se precisa de gran espacio para la instalación de los pantógrafos, el sistema fotovoltaico y sistema de almacenamiento.

Con el fin de determinar con precisión el espacio requerido para la instalación de cada componente, a continuación, se presenta una estimación del área necesaria para cada uno de ellos:

- Planta de paneles fotovoltaicos: En este caso, dependerá de la demanda energética de la flota asignada a cada patios y de su consumo diario.



Considerando dos casos:

- En el primer caso, partiendo de los datos disponibles de la tabla de datos del Instituto Nacional de Tránsito y Transporte Terrestre (INTRANT), que se asemejan al recorrido (trayecto) de un módulo a otro, y basándose en un estimado conservador de los datos disponibles, se asume un consumo promedio de 350 kWh por día. Con las 6 horas disponibles para la recarga, se requeriría una potencia mínima por punto de recarga de 58,3 kW. Dado que el mercado no ofrece puntos de recarga específicamente de 58,3 kW, se consideraría el modelo más común de 75 kW por punto de recarga (PdR). Esto ofrecería una mayor flexibilidad en el horario de carga, permitiendo completar la recarga en aproximadamente 4,7 horas en lugar de las 6 completas.
- En el segundo caso, partiendo de los datos disponibles de los archivos “KMZ” de datos del Instituto Nacional de Tránsito y Transporte Terrestre (INTRANT), que se asemejan en algunos casos al recorrido de un trayecto de módulo a módulo y módulo a módulo, y asumiendo un consumo estimado más alto de 600 kWh por día, se necesitaría una potencia mínima por punto de recarga de 100 kW. Para mantener una flexibilidad similar en el horario de recarga, sería aconsejable optar por equipos de recarga de mayor capacidad, como los de 120 o 150 kW.

En base a una hipótesis de 150 autobuses por módulo, la demanda energética total aproximada sería de: 52.500 kWh y de 90.00 kWh para el primero y segundo caso respectivamente. La demanda de potencia total aproximada para una carga nocturna completa sería de 8.745 kW y 15.000 kW para el primero y segundo caso respectivamente. (Es importante mencionar que en el caso de que se contemple la oportunidad de dar una carga diurna en el tiempo de regulación de los autobuses, se debería contemplar una potencia adicional a estos valores, dado que los algunos equipos (aprox. 5%) deberán suministrar una mayor potencia en menor tiempo).

Sabiendo que en un caso desfavorable en República Dominicana existe un coeficiente aproximado de generación de energía por paneles fotovoltaicos en un ángulo de 10° de 0,79 kWh/m²/día, la superficie mínima para cumplir con la demanda energética sería: 76.086 m² y 130.434 m² para el primero y segundo caso respectivamente. Por lo tanto, dado las dimensiones de los patios, sería difícil producir la energía demandada, incluso cubriendo por completo con paneles solares la superficie útil.

- Instalaciones de conexión de la red y de infraestructura de recarga y plazas de autobús: Todos los elementos que permitan la conexión a la red, celdas de líneas, celdas de protección, transformadores, entre otros, podrían ocupar un espacio aproximado de 24 m², considerando un edificio PFU7.

En cuanto al resto de elementos y a las plazas de autobús, se considera una



marquesina con varios pisos en la que incluso se podría aprovechar la cubierta para la instalación de los paneles fotovoltaicos.

A modo de ejemplo, una marquesina para 52 plazas de autobús correspondería a una superficie mínima de 2614,75 m² (104,59 m de longitud y 25 m de amplitud), incluyendo plazas de autobús, equipamiento eléctrico (armarios, puntos de recarga, cableado, entre otros).

Instalaciones de almacenamiento de energía: Asumiendo un producto en el mercado de unos 15 m² de superficie del contenedor de baterías para una capacidad de almacenamiento de 2,26 MWh y que se quiere almacenar la capacidad total de la demanda energética, el resultado sería el siguiente: 350 m² y 600 m² para el primero y el segundo caso de demanda energética respectivamente. La instalación es más compleja que en el caso de los cargadores de carga lenta y se necesitan servicios de energía con gran potencial para dar servicio a los cargadores que pueden llegar a 350-400 kW o mayores, somete a mayor esfuerzo a la red eléctrica (alta demanda de energía en cortos periodos de tiempo).

Considerar que la carga de pantógrafo está más desarrollada para elevadas potencias a diferencia de la carga con manguera.

Sostenibilidad y medio ambiente

Se quiere hacer mención a la posibilidad de combinar carga lenta con carga de oportunidad/rápida, combinando la carga lenta al final del servicio con la carga rápida en ruta. Un dimensionamiento correcto de las baterías en función de los requisitos de uso garantiza la máxima eficiencia energética y un menor estrés para la red eléctrica. Sin embargo, esta combinación implica mayores costes de inversión en infraestructura, pero que proporciona un gran incremento en la autonomía y una elevada disponibilidad de cada autobús

Como conclusión a este apartado, cabría destacar:

El pantógrafo permite al bus eléctrico recargar sus baterías en las paradas de autobús. Este sistema de carga ultrarrápida o de oportunidad solo necesita un periodo de cinco minutos para cargar el 80% de una batería. Una de las ventajas de estos vehículos es que, al tener una menor capacidad, suelen ser más ligeros y baratos.

El principal inconveniente de este sistema de carga es que su instalación es bastante costosa y se debe disponer de mayor terreno para la instalación del pantógrafo y la gran modificación estética que provoca en las ciudades.

Su mayor ventaja es su carga ultrarrápida, las potencias de carga pueden ser de 150 kW, 300 kW o 450 kW, que suministran a cualquier autobús la suficiente energía en unos pocos minutos para poder hacer su recorrido urbano sin detenerse durante todo el día. Pueden alternarse con la carga mediante mangueras durante la noche para realizar cargas más lentas y completas mientras los autobuses pernoctan, pero que durante el día dejarían los servicios inactivos durante largos períodos, lo cual haría tener grandes carencias durante los servicios.



Además, cabe destacar la mayor facilidad para los conductores para hacer las recargas de manera fácil y rápida, ya que basta con enganchar el autobús con el pantógrafo para su conexión, sin tener que bajarse del autobús, conectar la manguera, entre otras acciones, siendo un proceso más automatizado y eficaz.

Existen dos tipos de pantógrafo en el mercado:

- Carga mediante pantógrafo estándar.

Este pantógrafo se monta en el vehículo, normalmente en el eje delantero, y en la infraestructura se instala una campana receptora que hace de interfaz. El coste de la infraestructura se reduce considerablemente y se reducen los riesgos de parálisis de la línea en caso de fallo mecánico del pantógrafo puesto que en este caso únicamente se pararía un autobús y no toda la infraestructura. Estos pantógrafos tienen dos tipos de conexión 5 polos (DC +, DC-, PE, PP y CP) o 4 polos (DC +, DC-, PE y CP). En este último se elimina el pin de proximity haciendo esta función el propio piloto.



Figura 5. Reportaje fotográfico de pantógrafo estándar (all-i-one)

- Carga mediante pantógrafo invertido

Este pantógrafo se monta en la infraestructura y en el autobús se montan simplemente dos raíles. Esta solución abarata considerablemente el coste del autobús por sustituir un pantógrafo por dos simples raíles, pero encarece de una manera muy elevada la infraestructura por no solo añadir el coste de un pantógrafo especial sino también por la necesidad de reforzar el palo para recibir la nueva mecánica. En este caso se prioriza el coste del autobús reduciendo en compras de flotas, aunque si finalmente se precisa de una infraestructura en cocheras este coste se multiplica considerablemente, porque no solo se tendrá la misma cantidad de pantógrafos, sino que además estos pantógrafos son más



complejos y la estructura que los recibe tiene que estar debidamente reforzada. Además, se incrementa la complejidad de las comunicaciones entre el autobús y el punto de recarga.



FIGURA 6. PANTÓGRAFO INVERTIDO. FUENTE: WABTEC CORPORATION



5. MODELO DE PILA DE COMBUSTIBLE “HIDRÓGENO”

Identificación de tecnologías

El autobús de hidrógeno es un vehículo de transporte de pasajeros usado en todas las regiones del mundo. Su singularidad está en que emplea un motor de hidrógeno para impulsarlo. El concepto es similar a los coches o camiones de hidrógeno. Son variantes que incorporan elementos para utilizar otro tipo de combustible, en este caso, el hidrógeno. El autobús de hidrógeno obtiene la energía mediante una reacción química completamente limpia basada en el hidrógeno. Es libre de emisiones y evita la contaminación atmosférica.



FIGURA 7. AUTOBÚS DE HIDRÓGENO DE ALSA, DE LA COMUNIDAD DE MADRID. FUENTE: EUROPA PRESS

Capacidad y velocidad de recarga

La autonomía es comparable a la de los vehículos tradicionales de combustible fósil, con tiempos de reabastecimiento rápidos y cero emisiones de gases nocivos. Sin embargo, es importante notar que la producción, la distribución y el almacenamiento del hidrógeno requieren infraestructuras especializadas y que la producción de hidrógeno mismo, como de otras fuentes de energía, puede implicar emisiones de carbono a menos que no se produzca utilizando fuentes de energía renovables o procesos de producción a base de emisiones de carbono.

Costes iniciales y operativos

Menos del 0,7 % de la producción actual de hidrógeno proviene de energías renovables o de plantas de combustibles fósiles equipadas con CCS por lo que la producción de hidrógeno hoy en día es responsable de 830 MtCO₂/año.

- En el caso del hidrógeno, las pérdidas de eficiencia pueden acumularse en diferentes etapas de la cadena de valor. Después de convertir la electricidad en hidrógeno, enviarla y almacenarla y luego convertirla de nuevo en electricidad en una pila de combustible, la energía entregada puede estar por debajo del 30 %. Esto hace que el hidrógeno sea más caro que la electricidad o el gas natural utilizado para producirlo. También se aboga por minimizar el número de conversiones entre



- portadores de energía en cualquier cadena de valor.
- Como gas ligero de moléculas pequeñas, el hidrógeno requiere equipos y procedimientos especiales para manejarlo. La molécula de hidrógeno es tan pequeña que puede difundirse en algunos materiales, incluidos algunos tipos de tuberías de hierro y acero y aumentar su probabilidad de fallo. También se escapa más fácilmente a través de sellos y conectores que las moléculas más grandes, como el gas natural.
 - Se deberá tener en cuenta también el coste asociado a la instalación de infraestructura de reabastecimiento de hidrógeno, incluyendo el uso de las hidrogeneras cerca de los sitios de producción de hidrógeno
 - El gasto de la electrolisis es muy elevado.

Eficiencia energética

El hidrógeno es capaz de abarcar todas las aplicaciones del transporte, si bien debería ser utilizado para aquellas aplicaciones donde la descarbonización sea una barrera para otro tipo de alternativas y tecnologías. Dispone de la madurez tecnológica suficiente y los avances y desarrollos realizados permiten hacer una proyección de reducción de precio tanto en términos de €/kg H₂ como de los dispositivos una vez que comience un despliegue masivo y entren en juego las economías de escala, pero actualmente tiene un coste muy elevado y su uso no se ve totalmente adecuado para el transporte, en este caso.

Compatibilidad con la situación actual de República Dominicana del servicio de transporte público y la red de distribución

Un autobús de hidrógeno consume aproximadamente 7 litros de hidrógeno verde por cada 100 km. Esto equivaldría a 50 litros de diésel. De esta forma, evita la emisión de 132 kg. de CO₂ a la atmósfera.

Como mínimo alcanza los 400 kilómetros, gracias a las mejoras en las pilas de combustible. El repostaje dura un tiempo aproximado de nueve minutos. El autobús puede poseer unos cinco depósitos, ubicados en el techo. Los depósitos de combustible albergan una capacidad para 37 kilos, aprox. Además, tiene la ventaja de contar con un motor completamente silencioso y materiales más ecológicos. No utiliza fluidos corrosivos. Esto aporta una mejora ambiental frente a las baterías.

Como fuente de combustible, el hidrógeno es entre dos y tres veces más eficiente que los motores convencionales, por lo que permite llegar más lejos con menos combustible. Y como su único subproducto es agua limpia, los vehículos propulsados por hidrógeno eliminan las emisiones de CO₂ (y de otros gases como el HC, CO y NO).

Fiabilidad y Durabilidad

Las baterías duran aproximadamente 10 años, las celdas de hidrógeno no parecen tener límite.



Casos de estudio y uso actual, complejidad y futuro y tendencias

Actualmente, los FCEV tienden a ser más costosos que los VEB y de los vehículos tradicionales a causa de los costes asociados a las celdas de combustión y al hidrógeno.

Sin embargo, con el mejoramiento de las tecnologías y el crecimiento de la producción a gran escala, se prevé una reducción de los costes en el tiempo.

Debemos tener en cuenta que los autobuses de hidrógeno consumen entre tres y cuatro veces más electricidad de la que consumiría un autobús eléctrico. Electrificar los vehículos directamente es mucho más efectivo.

Infraestructura y escalabilidad

A destacar la necesidad de disponer del espacio suficiente para la construcción de hidrogeneras y la cercanía a fuentes de hidrógeno cercanas para evitar pérdidas en el transporte del mismo.

Sostenibilidad y medio ambiente

Entre las ventajas de este tipo de metodología, cabe destacar:

- Cero emisiones de CO₂: Las emisiones de GEI durante todo el ciclo de vida de la producción de hidrógeno renovable son prácticamente nulas, contribuyendo a disminuir la huella ambiental.
- Posee una alta densidad energética: Una pequeña cantidad de hidrógeno almacena grandes cantidades de energía.
- Tiene una amplia variedad de aplicaciones, incluyendo industria, transporte o almacenamiento de energía renovable a gran escala.
- Contribuye a reducir la dependencia de combustibles fósiles: El hidrógeno ofrece un gran potencial como materia prima que sustituye los combustibles no renovables en sectores de difícil descarbonización como el acero, el cemento y el transporte pesado.

Por otro lado, el hidrógeno renovable presenta también una serie de desventajas como son:

- Coste elevado: Aunque los costes del hidrógeno verde están bajando rápidamente, tal como señala la Comisión Europea, es más costoso de producir que otras formas de energía convencionales.
- La infraestructura para el almacenamiento, transporte y distribución de hidrógeno es aún limitada.
- Es altamente inflamable: Requiere medidas de seguridad en su manejo para evitar incendios.
- Necesita gran cantidad de electricidad renovable para llevar a cabo el proceso de electrólisis. Esto aumenta la demanda de renovables.
- Elevado uso de agua: La electrólisis para producir hidrógeno verde precisa agua



pura, desionizada o desmineralizada, sin impurezas ni aditivos. Generalmente se usa agua dulce, lo cual puede suponer un problema en lugares con escasez de agua.



6. OTRAS ALTERNATIVAS DE RECARGA

Queremos mencionar, otros dos tipos de recarga eléctrica a tener en cuenta para una flota de autobuses, como son:

Recarga inductiva

La recarga por inducción se efectúa mediante un sistema de dos bobinas magnéticas, situadas una en la parte inferior del autobús y otra empotrada en la calzada. La estación de recarga se activa eléctricamente solo cuando el sistema de control reconoce que un autobús con bobina inductiva se ha detenido encima.

Funciona utilizando una carretera segmentada de recarga que induce corriente en los módulos pick-up del vehículo. Esto elimina la necesidad de detener el bus en una estación de carga y no necesita de pantógrafo.

Los modelos más eficientes de baterías permiten que la carga por inducción sea más rápida y eficiente aún. Cargadores inductivos tienen potencias entre 100 y 200 (kW).

Para este tipo de servicios, los tipos de recarga eléctricos implica, sí o sí, una conexión del vehículo a un puesto de recarga y un tiempo de espera que conlleva un periodo de inactividad del vehículo.

La carga inductiva es una tipología de recarga poco extendida. Este tipo de carga tiene unos estándares de carga ya definidos o en estado de borrador (IEC 61980, SAI J1773 y SAE J2954), pero el mercado todavía duda de su tecnología.

Las pérdidas no son despreciables y los protocolos de comunicación, igual que en el pantógrafo invertido, no están claros. Hay proyectos pilotos tanto de carga inductiva estática como dinámica a nivel europeo, pero su explotación es poco aconsejable. La potencia máxima instalada de recarga de esta tecnología suele rondar los 100 kW.

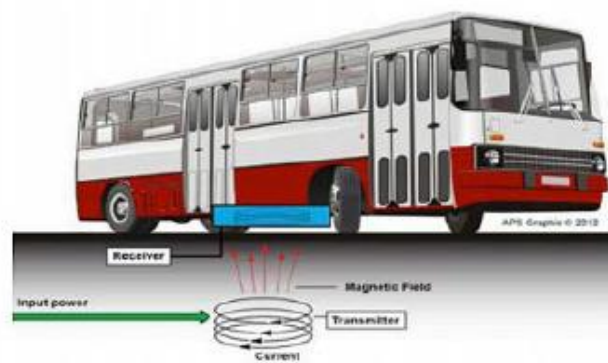


FIGURA 6. AUTOBÚS CON RECARGA DE INDUCCIÓN



Existen muy pocos modelos de autobús con esta tecnología inalámbrica y, actualmente, el desarrollo y despliegue está estancado por la falta de vehículos que incluyan esta tecnología, la gran adaptación que tendrían que realizar las ciudades, ya que exigen una obra civil y eléctrica bastante cara, y los estudios que demuestran la pérdida de energía, ya que no están conectados de manera directa.

Su abanico de potencias se compara al de los equipos de pantógrafo. Sin embargo, todavía se carece de experiencia, ya que se trata de una tecnología desconocida y reciente.

Recarga inductiva

El trolebús, también conocido como trolley o trole, es un autobús eléctrico, alimentado por una catenaria de dos cables superiores desde donde toma la energía eléctrica mediante dos astas. El trolebús no hace uso de vías especiales o carriles en la calzada, como el tranvía, por lo cual es un sistema más flexible. Cuenta con neumáticos de caucho en vez de ruedas de acero en carriles.

La transmisión directa de electricidad, como la usada en el trolebús, es mucho más eficiente que la producción, el transporte, el almacenamiento y el aprovechamiento energético.

Uno de los principales inconvenientes del trolebús, es que, si se separa accidentalmente de la catenaria, se para. Por el mismo motivo, los recorridos posibles se limitan a los tramos con catenarias instaladas. Sin embargo, se puede incorporar una batería o un motor térmico convencional para permitir una mayor versatilidad.

No obstante, todo el cableado aéreo que conlleva por toda la ciudad, en todas las rutas, se debe tener en cuenta para su correcto funcionamiento. No solo visualmente conlleva la visión de toda la ciudad llena de cables, sino que no en todas las rutas es posible por su infraestructura, como puede ser el caso, en la Ciudad de Santo Domingo, ya que sería una instalación muy compleja.

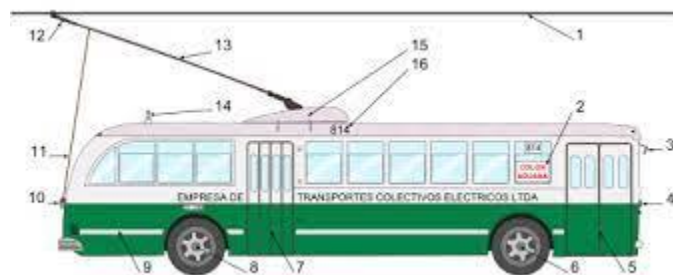


FIGURA 7. TROLLEYBUS. FUENTE: WIKIPEDIA+



6. CONCLUSIÓN

En conclusión, de todas las alternativas de modelos de recarga para la flota electrificada de autobuses, el sistema de intercambio de baterías ("swap") parece ser el más adecuado. Esta preferencia se alinea con las directrices del Consejo Unificado de las Empresas Distribuidoras de Electricidad (CUED), quienes favorecen la inversión en sistemas de almacenamiento de energía en lugar de infraestructuras de generación, como las plantas fotovoltaicas. Una estación de intercambio de baterías requiere, por su naturaleza, de una infraestructura de almacenamiento, coincidiendo con la visión del CUED. Dado que actualmente, según datos de CUED, se posee suficiente energía renovable para no ser necesaria una generación adicional. Por lo tanto, el modelo de "swap" de baterías no solo facilitaría un acuerdo con la red de distribución, sino que también ofrece beneficios adicionales, como una velocidad de carga excepcionalmente rápida y una eficiencia notable, ventajas que otras alternativas no pueden garantizar.

Otras ventajas de que convierten en el "swap" de baterías en un modelo adecuado para el servicio de transporte público de autobuses objeto de estudio, son las siguiente:

- La recarga de vehículos eléctricos (EV) se completa en minutos.
- Las baterías pueden ser cargadas lejos del punto de intercambio, permitiendo más libertad para establecer instalaciones de intercambio.
- Reducción en el costo inicial del EV, ya que la propiedad de la batería es reemplazada por el arrendamiento de baterías.
- Aumento de la previsibilidad de la vida útil de la batería debido a condiciones de carga controladas.

Sin embargo, siempre se deberán tener en cuenta las barreras que supone la implementación de este modelo de carga:

- Falta de estandarización entre las baterías de EV.
- Tecnología con experiencia limitada.
- Diseño de paquetes de baterías inadecuado para facilitar el intercambio (peso, dimensiones y ergonomía).
- Se necesita un mayor número de baterías para alimentar la misma cantidad de EVs.
- Costos más altos del arrendamiento de baterías a lo largo de la vida del EV.



Financiado por
la Unión Europea



FIIAPP
COOPERACIÓN ESPAÑOLA




PRESIDENCIA DE LA
REPÚBLICA DOMINICANA
**Consejo Nacional
para el Cambio Climático**


INTRANT
INSTITUTO NACIONAL DE TRÁNSITO
Y TRANSPORTE TERRESTRE