OPTIMIZACIÓN DE LA RECARGA DE FLOTAS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN COORDINACIÓN CON LAS NECESIDADES DEL DSO

Raúl Peña Gracia, Flexibilidad, Procesos y Tecnología, i-DE (Grupo Iberdrola)
Javier Fernández Fernández, Flexibilidad, Procesos y Tecnología, i-DE (Grupo Iberdrola)
Jesús Varela Sanz, Responsable Flexibilidad, Procesos y Tecnología, i-DE (Grupo Iberdrola)

Resumen: La creciente electrificación del transporte convierte a las flotas de vehículos eléctricos en un recurso con gran potencial para proporcionar flexibilidad a las redes de distribución. En este trabajo se presenta un algoritmo de planificación inteligente de la recarga desarrollado en el marco del proyecto *ECLIPSE*, capaz de integrar simultáneamente criterios económicos, ambientales y requerimientos operativos del operador de la red de distribución (DSO). La solución ha sido validada mediante simulaciones sobre una flota real de vehículos eléctricos, evaluando distintos escenarios de optimización por coste, emisiones de CO_2 y provisión de flexibilidad a la red. Los resultados muestran reducciones de coste cercanas al 20 %. Asimismo, se analiza el impacto de diferentes consignas de reducción de potencia solicitadas por el DSO, cuantificando tanto la flexibilidad máxima disponible como el coste de oportunidad asociado a su utilización. Los resultados permiten identificar los límites operativos de la flota, así como estimar el nivel de compensación económica necesario para incentivar su participación en futuros mercados locales de flexibilidad. La metodología propuesta proporciona una herramienta práctica para valorar la capacidad real de respuesta de una flota eléctrica ante solicitudes de flexibilidad y evaluar su viabilidad técnica y económica como recurso para la operación de la red.

Palabras clave: Flexibilidad, Vehículo Eléctrico, Recarga Inteligente, Operador de la red de distribución, Algoritmo, Estrategia de optimización.

INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO

La electrificación del transporte está impulsando el desarrollo de algoritmos avanzados para la gestión de la recarga de vehículos eléctricos. En los últimos años se han publicado numerosos trabajos centrados en la optimización de la recarga de flotas y autobuses eléctricos, abordando objetivos como la reducción de costes energéticos, la disminución de emisiones de CO_2, la limitación de picos de demanda o la provisión de servicios al sistema eléctrico. Asimismo, diversos autores han puesto de manifiesto el potencial de las flotas eléctricas como recurso de flexibilidad para la red mediante estrategias de recarga inteligente y *Vehicle-to-Grid* (V2G) [1],[2].

Sin embargo, la mayoría de las propuestas existentes se desarrollan en entornos de simulación o se centran en objetivos específicos de optimización. En esta comunicación se presenta una aplicación práctica orientada a la operación real de una flota de vehículos eléctricos, en la que se consideran simultáneamente criterios económicos, ambientales y requerimientos de flexibilidad procedentes del operador de la red de distribución (DSO). El objetivo no consiste únicamente en optimizar la recarga de la flota, sino también en cuantificar el impacto que las solicitudes de flexibilidad del DSO tienen sobre los costes de operación y el cumplimiento de los requisitos energéticos de los vehículos.

Este trabajo se enmarca en el proyecto europeo *ECLIPSE*, cuyo objetivo es desarrollar y demostrar un Marco Europeo Común de Referencia (CERF) para servicios energéticos flexibles e interoperables. Dentro del demostrador español, ubicado en el Campus de Iberdrola de San Agustín de Guadalix (Madrid), i-DE (Grupo Iberdrola) ha desplegado una infraestructura compuesta por puntos de recarga y un servidor central para la gestión segura de las comunicaciones con plataformas externas, con una aplicación de usuario y un sistema de optimización capaz de generar planes de recarga adaptados tanto a las preferencias de los usuarios como a las necesidades operativas de la red.

La arquitectura desarrollada se integra además con SIORD [3], la plataforma impulsada por los distribuidores españoles, para facilitar un intercambio de información transparente y estandarizado entre compañías distribuidoras, comercializadoras y otros agentes del sistema eléctrico (*Figura 1*). Dicha plataforma permite trasladar las necesidades de flexibilidad identificadas por el DSO hasta recursos gestionables como las flotas de vehículos eléctricos, posibilitando la evaluación de su capacidad para prestar servicios de apoyo a la operación de la red.

Internal Use

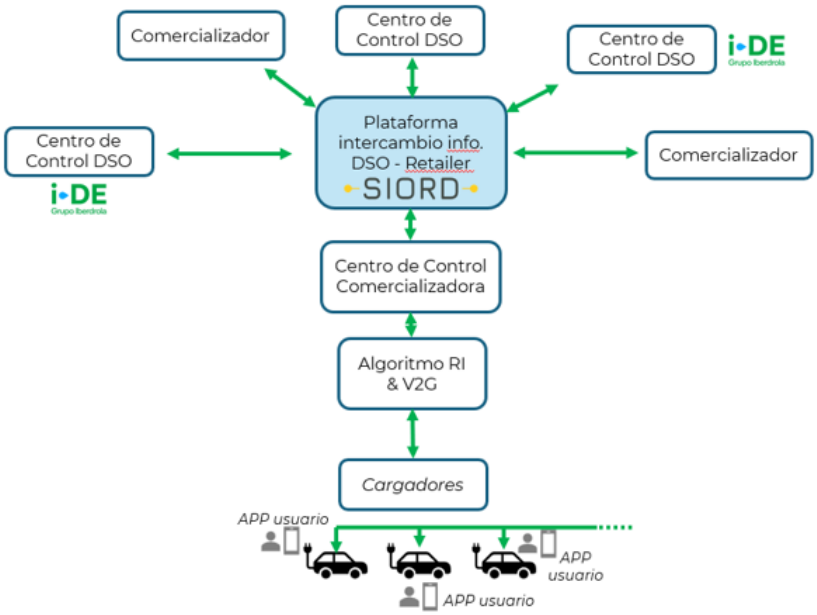


Figura 1. Flujo de información entre DSO, comercializadoras, plataforma SIORD y recursos de recarga eléctrica para la coordinación de servicios de flexibilidad y optimización de la demanda.

La presente comunicación se centra en la aplicación de esta arquitectura al caso de una flota de vehículos eléctricos, evaluando el impacto económico y ambiental de diferentes estrategias de recarga y analizando la capacidad de la flota para proporcionar flexibilidad al DSO, manteniendo el cumplimiento de sus requisitos operativos.

DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN

La solución propuesta se ha validado utilizando como caso de estudio el programa de carga real de una flota de autobuses eléctricos de transporte interurbano ubicada en una estación de la provincia de Valencia. La flota está compuesta por 43 vehículos eléctricos, de los cuales 41 prestan servicio diurno, y dispone de una infraestructura de recarga formada por 22 cargadores dobles de 120 kW de potencia nominal, instalados en las cocheras del operador.

Aunque la potencia nominal agregada de la infraestructura de recarga supera la demanda máxima prevista, la potencia disponible para la instalación está limitada a 2.000 kW debido a restricciones de capacidad de la red de distribución.

En la situación actual, la recarga de la flota se realiza durante las horas nocturnas, coincidiendo con los periodos de estacionamiento de los vehículos en cochera. La planificación se orienta principalmente a garantizar la disponibilidad de los autobuses para la prestación del servicio programado, asegurando que alcancen el nivel de carga requerido antes del inicio de la siguiente jornada de operación.

Sobre este caso de estudio se ha desarrollado un algoritmo de planificación capaz de compatibilizar simultáneamente los requerimientos operativos de la flota con las necesidades de la red eléctrica. Para ello, el sistema considera la disponibilidad temporal de cada vehículo, su estado de carga (SOC) inicial, las necesidades energéticas asociadas a las rutas programadas, las restricciones de potencia de la instalación y las señales de operación procedentes del DSO. El resultado es una planificación optimizada de la recarga que permite evaluar el potencial de reducción de costes, emisiones y potencia demandada, así como la capacidad de la flota para proporcionar servicios de flexibilidad a la red de distribución.

Internal Use

METODOLOGÍA

La metodología de validación del algoritmo se basa en un conjunto de escenarios de simulación que reproducen diferentes condiciones operativas de una flota de buses eléctricos. En todos los casos, la planificación de la recarga debe satisfacer los requerimientos energéticos de los vehículos dentro de sus ventanas de disponibilidad, respetando las limitaciones de potencia y de infraestructura existentes.

En primer lugar, se analizó la optimización de la recarga a partir de señales horarias externas, considerando tanto los precios del mercado diario como los factores de emisión de CO_2 de la generación eléctrica. Dado que ambas magnitudes presentan una variación temporal, el algoritmo desplaza la demanda de recarga hacia los periodos más favorables en función del criterio de optimización seleccionado. Este escenario permite evaluar tanto el potencial de reducción de costes energéticos para el gestor de la flota como la disminución de las emisiones asociadas a su consumo eléctrico.

Posteriormente, se ha estudiado la capacidad de la flota para proporcionar flexibilidad al operador de la red de distribución (DSO). Para ello, se simularon distintas consignas de reducción de potencia solicitadas por el DSO, considerando distintas franjas horarias de activación. El objetivo consistió en determinar hasta qué punto la demanda de recarga puede flexibilizarse para atender las necesidades del DSO sin comprometer la operativa prevista de la flota. Cuando una solicitud de flexibilidad impide satisfacer las necesidades de carga programadas, el algoritmo identifica incumplimientos de carga incompleta o no iniciada; así como la necesidad de adoptar medidas adicionales, como, por ejemplo, una replanificación del estado de carga final de los vehículos menos prioritarios.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos muestran el elevado potencial de la recarga inteligente para reducir tanto los costes de operación como las emisiones asociadas al consumo eléctrico de una flota de vehículos eléctricos. En todos los escenarios analizados (*Tabla I*) se observan mejoras respecto al patrón de carga actual, aunque la magnitud de dichas mejoras depende del criterio de optimización seleccionado y de las restricciones solicitadas por el DSO.

La optimización económica permite reducir el coste de recarga en un 20,0 % respecto al patrón de carga actual cuando el objetivo es que todos los vehículos alcancen un SOC final del 100 %. De forma similar, la optimización basada en factores horarios de emisión proporciona una reducción del 11,4 % respecto a las emisiones del caso base. El algoritmo es capaz de desplazar la demanda hacia periodos con menores emisiones de carbono y reducir el impacto ambiental asociado a la recarga de la flota.

Se ha analizado también un escenario alternativo en el que únicamente se carga la energía necesaria para efectuar la siguiente ruta, incorporando un margen adicional de seguridad del 10%. Sin embargo, esta estrategia presenta varias limitaciones. Por una parte, resulta adecuada únicamente para horizontes temporales cortos, ya que el margen de seguridad no puede reducirse indefinidamente sin comprometer la operación futura de la flota. Por otra parte, se observa que el ahorro económico adicional respecto al escenario optimizado con SOC final del 100 % es reducido, debido a que la curva de precios durante el periodo principal de recarga nocturna suele presentar variaciones limitadas.

Por otro lado, la incorporación de requerimientos de flexibilidad por parte del DSO introduce un nuevo escenario en el que la instalación puede prestar un servicio a la red a cambio de una contraprestación económica. En el escenario de reducción de potencia a 1900 kW durante una hora, el ahorro económico sigue siendo elevado (16,8 %) y no se producen incumplimientos de recarga. Sin embargo, al aumentar la severidad de la restricción comienzan a aparecer recargas incompletas e incluso vehículos cuya recarga no puede iniciarse. En particular, los escenarios de 1700 kW durante cuatro horas (*Figura 2*) y 1500 kW durante cinco horas representan el límite a partir del cual la prestación de flexibilidad comienza a afectar a la operación normal de la flota. Debe señalarse que el escenario de 1500 kW durante cinco horas (caso 5; en la *Tabla I*) presenta un ahorro económico ligeramente superior al de 1700 kW durante cuatro horas (caso 4) debido a que un número significativo de vehículos no alcanza el nivel de carga requerido e incluso algunos de ellos no pueden ser atendidos. Por tanto, este resultado no debe interpretarse como una mayor eficiencia de la estrategia, sino como una consecuencia directa de la reducción de energía finalmente suministrada a la flota debido a las restricciones impuestas por la red.

Internal Use

Desde un punto de vista económico, estos resultados permiten cuantificar el coste de oportunidad asociado a la prestación de flexibilidad. Cada consigna de reducción de potencia obliga a desplazar parte de la recarga fuera de los periodos económicamente más favorables, generando un sobrecoste para el gestor de la flota respecto al escenario óptimo de recarga. En consecuencia, la participación en un futuro mercado local de flexibilidad únicamente resultará atractiva para el cliente si la remuneración recibida supera dicho sobrecoste, además de cubrir los costes de operación y mantenimiento asociados a la aplicación de optimización. Es decir, la compensación económica no debería limitarse a neutralizar la pérdida ocasionada por la modificación del plan de recarga, sino proporcionar un beneficio adicional que incentive la disponibilidad voluntaria del recurso.

Conviene señalar que el volumen diario de energía recargada en el caso de estudio es del orden de 9,8 MWh**,** por lo que los porcentajes de ahorro económico y ambiental presentados en la *Tabla I* están referidos a este escenario base.

DESCRIPCIÓN DEL CASO	**SOC FINAL: 100%**			
	Caso	Coste	Nº Incumplimientos recarga	
			Carga incompleta	Carga no iniciada
Optimización **económica** de la recarga	**1**	-20,0%	N/A	N/A
Optimización de **emisiones de CO2** de la recarga	**2**	-11,4%	N/A	N/A
Optimización **económica +** Requerimiento **DSO** reducción potencia: ***1900kW-1hora***	**3**	-16,8%	0	0
Optimización **económica +** Requerimiento **DSO** reducción potencia: ***1700kW-4horas***	**4**	-12,7%	20	0
Optimización **económica +** Requerimiento **DSO** reducción potencia: ***1500kW-5horas***	**5**	-16,0%	19	2

Tabla I. Comparativa del desempeño de los escenarios de recarga bajo distintos criterios de optimización y restricciones de red.

Internal Use



Figura 2. Efecto de una restricción de potencia del DSO sobre la programación óptima de la recarga de la flota (caso 4 - 1700 kW durante 4 horas). En color verde se muestra el perfil horario de potencia demandada por la estación de recarga, en azul el límite dinámico de potencia impuesto por el DSO y en rojo la evolución del precio de la energía.

La capacidad de flexibilidad disponible para el DSO depende de la duración de la solicitud y del objetivo de carga adoptado (*Tabla II*). Para una ventana de flexibilidad de una hora, la instalación puede asumir reducciones de potencia de hasta 2 MW, equivalentes a la potencia nominal de la estación, en ambos escenarios analizados. Sin embargo, para ventanas más prolongadas, la flexibilidad disponible disminuye progresivamente. En el caso de una duración de cuatro horas, la potencia flexible máxima compatible con la operativa de la flota es de 1 MW cuando todos los vehículos deben alcanzar el 100 % de SOC, mientras que aumenta hasta 1,4 MW cuando únicamente se exige la energía necesaria para la siguiente ruta, incluyendo el margen de seguridad del 10%. Para una ventana de cinco horas, dicha capacidad se reduce hasta 950 kW en el escenario de carga completa, pudiendo alcanzar 1,2 MW en el escenario basado en las necesidades reales de operación de los vehículos.

Estos resultados indican que la gestión inteligente de la recarga permite transformar la infraestructura en un recurso flexible para la red, manteniendo simultáneamente los requisitos operativos de la flota. Además, proporcionan una referencia cuantitativa para futuros servicios de flexibilidad, ya que permiten al DSO conocer de antemano el nivel máximo de reducción de potencia que puede solicitar sin comprometer el cumplimiento de las necesidades energéticas de los vehículos.

VENTANA DE FLEXIBILIDAD	SOC FINAL 100%	SOC FINAL: RECORRIDO RUTA +10%
1 hora	Máxima (2000 kW)	Máxima (2000 kW)
4 horas	1000 kW	1400 kW
5 horas	950 kW	1200 kW

Tabla II. Flexibilidad disponible para el DSO bajo los dos escenarios analizados.

Por último, debe señalarse que las simulaciones se han realizado utilizando datos correspondientes a un día laborable de primavera, en condiciones climatológicas óptimas. En situaciones de frío o calor extremos, el consumo energético de los vehículos puede aumentar significativamente debido a los sistemas de climatización. *Cigarini et al.* [4] observaron incrementos del consumo energético de hasta un factor 1,9 en autobuses eléctricos durante la operación

Internal Use

invernal con calefacción activada, mientras que Heß et al. [5] analizaron durante un año completo el impacto de los sistemas HVAC sobre el consumo energético de autobuses eléctricos en condiciones reales de operación.

Los resultados obtenidos corresponden a una optimización diaria, en la que todos los vehículos deben satisfacer sus necesidades energéticas dentro de la propia jornada analizada. En la práctica, podrían existir estrategias más avanzadas basadas en horizontes temporales de varios días, aprovechando periodos de menor utilización de la flota, como fines de semana o jornadas de baja actividad, para desplazar parte de la energía a momentos más favorables desde el punto de vista económico o ambiental. El análisis de este tipo de estrategias queda fuera del alcance de la presente comunicación y se plantea como una línea de trabajo futura.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que las flotas de vehículos eléctricos pueden constituir un recurso de flexibilidad relevante para las redes de distribución. El algoritmo desarrollado ha permitido cuantificar el impacto de distintas solicitudes de flexibilidad del DSO sobre los costes de operación y el cumplimiento de las necesidades de carga de la flota. Los resultados muestran que consignas moderadas de reducción de potencia pueden ser absorbidas sin incumplimientos y con una penalización económica limitada, mientras que restricciones más exigentes comienzan a generar recargas incompletas e incluso vehículos cuya recarga no puede programarse completamente. De este modo, la metodología permite identificar los límites reales de prestación de flexibilidad antes de comprometer la operación de la flota.

Asimismo, los resultados ponen de manifiesto que la estrategia de recarga adoptada influye de forma significativa en la flexibilidad disponible para la red. Cuando el objetivo de carga se adapta a las necesidades reales de operación de los vehículos, en lugar de exigir sistemáticamente una recarga completa, la capacidad de respuesta de la flota aumenta de forma apreciable. La metodología propuesta permite estimar previamente tanto la potencia flexible disponible como el coste de oportunidad asociado a cada solicitud de flexibilidad. Esta información resulta especialmente útil en un escenario futuro de mercados locales de flexibilidad, ya que permite valorar económicamente la participación de la flota, determinar la remuneración necesaria para incentivar la prestación de servicios y proporcionar al DSO una estimación realista de la capacidad de respuesta disponible en cada periodo de operación.

REFERENCIAS

[1] Hu, J., Morais, H., Sousa, T. & Lind, M., 2016, Electric Vehicle Fleet Management in Smart Grids: A Review of Services, Optimization and Control Aspects, Renewable & Sustainable Energy Reviews, Vol. 56, pp. 1207-1226.

[2] Ju, Y., Li, L., Wang, J. & Moura, S., 2026, Scalable Optimization for Mobility-Aware Coordinated Electric Vehicle Charging in Distribution Power Networks, arXiv preprint arXiv:2604.11999.

[3] SIORD, Sistema de Información de los Operadores de Redes de Distribución, https://siord.es/ (7 septiembre 2026)

[4] Cigarini, F., Fay, T.A., Artemenko, N. & Göhlich, D., 2021, Modeling and Experimental Investigation of Thermal Comfort and Energy Consumption in a Battery Electric Bus, World Electric Vehicle Journal, Vol. 12, No. 1.

[5] Heß, L., Dimova, D., Piechalski, J.W., Rusche, S., Best, P. & Sonnekalb, M., 2023, Analysis of the Specific Energy Consumption of Battery-Driven Electrical Buses for Heating and Cooling in Dependence on the Technical Equipment and Operating Conditions, World Electric Vehicle Journal, Vol. 14, No. 5.



This project has received funding from the European Union's Digital Europe research and innovation programme under the Grant agreement Nº 101158494. *Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them*

Internal Use