



Emisión sonora de las estaciones de carga rápida para vehículos eléctricos

David Clar García¹, Miguel Fabra Rodríguez¹, Héctor Campello Vicente¹, Emilio Velasco Sánchez¹

¹ Instituto de Investigación en Ingeniería de Elche, Universidad Miguel Hernández de Elche, dclar@umh.es, mfabra@umh.es, hcampello@umh.es, emilio.velasco@umh.es

Los vehículos eléctricos son considerados como una herramienta para apoyar la descarbonización del sector del transporte. Además, los vehículos eléctricos reducen la contaminación acústica debida a su circulación en áreas urbanas, contribuyendo a una disminución general de los niveles sonoros en las ciudades. A pesar de sus ventajas, la adopción de los vehículos eléctricos enfrenta limitaciones, particularmente relacionadas con la autonomía de las baterías y los tiempos de carga, aspectos que han sido mitigados gracias a las recientes mejoras en la tecnología de carga rápida.,

Sin embargo, este trabajo destaca una desventaja de las estaciones de carga rápida de corriente continua: emisiones de ruido de alta frecuencia durante la carga rápida, que pueden molestar a los residentes cercanos, especialmente en núcleos urbanos y residenciales. Este ruido, resultado de la creciente infraestructura de carga rápida, ha generado quejas e incluso restricciones operativas para algunas estaciones de carga. Por ello, este trabajo analiza las emisiones sonoras de una amplia muestra de estaciones de carga rápida de corriente continua de las principales marcas del mercado europeo, con el objetivo de proporcionar herramientas que ayuden a fabricantes, instaladores y operadores de estaciones de carga rápida a mitigar las emisiones sonoras mencionadas.

Introducción

Los vehículos eléctricos constituyen una alternativa viable para la transición hacia la descarbonización del modelo energético actual, especialmente en el sector del transporte. La necesidad de alcanzar los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero establecidos por el Acuerdo de París obliga a los estados miembros a adoptar medidas urgentes en sectores clave como el transporte automovilístico. De hecho, uno de los objetivos estratégicos es fomentar la movilidad sostenible mediante el desarrollo e implementación de vehículos eléctricos. Sin embargo, las limitaciones de los vehículos eléctricos, en comparación con los vehículos impulsados por combustibles fósiles, hacen que su adopción siga siendo limitada, a pesar de las numerosas ventajas que ofrecen frente a los vehículos convencionales.

Dos de las principales limitaciones de los vehículos eléctricos son su autonomía y el tiempo necesario para recargar la batería. Sin embargo, ambos factores han mejorado significativamente en los últimos años, permitiendo, en la mayoría de los casos, no solo realizar trayectos rutinarios, sino también viajes largos sin diferencias significativas en comparación con los vehículos de motor de combustión interna (ICE), siendo actualmente entre un 11 % y un 27 % más largos que el tiempo requerido por un vehículo ICE [1,2]. Es durante estos trayectos más largos donde la capacidad de carga rápida del vehículo y la infraestructura de carga desempeñan un papel crucial para lograr tiempos de viaje comparables a los vehículos tradicionales, ya que ambos elementos afectan significativamente los tiempos de las sesiones de carga. De hecho, se espera que los tiempos de viaje en trayectos largos para los vehículos eléctricos sean similares a los de los vehículos ICE, con una breve parada cada 2–3 horas de conducción, gracias a los cargadores de 350 kW [3].

Por otro lado, la incorporación de los vehículos eléctricos a la flota automovilística ha contribuido, de manera individual, a la reducción de las molestias acústicas causadas por los motores de combustión interna convencionales [4]. Esta disminución de la contaminación acústica es especialmente significativa en áreas urbanas con saturación acústica, lo que permite una reducción general de los niveles de ruido urbano y contribuye a un entorno de vida más saludable [5].

Sin embargo, la expansión gradual de la red de carga rápida conductiva en corriente continua para vehículos eléctricos, que es el método más común en la actualidad [6], junto con la conveniencia de su proximidad a áreas comerciales u otros servicios como restaurantes, ha llevado a la aparición de estaciones de carga rápida cerca de lugares de trabajo e incluso áreas residenciales. No obstante, durante el proceso de carga rápida de las baterías, estas estaciones emiten ruidos de alta frecuencia dentro del rango superior del espectro sonoro, lo que puede resultar molesto para los habitantes de las zonas cercanas. Como consecuencia, algunos operadores de estaciones de carga se han visto obligados a cerrar o limitar la potencia de carga en diversas ubicaciones debido a las quejas de los residentes locales.

En entornos urbanos, las molestias relacionadas con el ruido son, posiblemente, una de las preocupaciones más prevalentes, ya que los estímulos auditivos son omnipresentes en los diversos paisajes sonoros donde las personas realizan sus actividades diarias [7]. La Organización Mundial de la Salud identificó el ruido como el segundo factor más significativo que contribuye a la "carga de enfermedad" atribuible al ruido ambiental en los países de la Unión Europea (UE) [8].

El impacto del ruido continuo en un individuo está influido tanto por las propiedades físicas (acústicas) del sonido como por diversos factores relacionados con la persona y el entorno. De hecho, en ciertos casos, las características acústicas del ruido pueden no contribuir significativamente al desarrollo de esta percepción [10]. Factores como la sensibilidad al ruido, predisposición genética, respuestas fisiológicas, estado psicológico y elecciones de estilo de vida pueden agravar la reacción de una persona al ruido [11], desempeñando así un papel crucial en la experiencia general [12].

Con el fin de reducir las molestias causadas por las emisiones sonoras durante la carga rápida de las baterías de vehículos eléctricos, esta investigación analiza tanto la emisión como la propagación del sonido de una amplia muestra de estaciones de carga rápida en corriente continua de marcas líderes en el mercado de la Unión Europea. El objetivo es proporcionar herramientas que ayuden a fabricantes, instaladores y operadores de estaciones de carga rápida a mitigar las emisiones sonoras mencionadas anteriormente.

Materiales y Metodología

2.1. Procedimiento de Medición del Ruido

Esta sección explica el procedimiento de medición para obtener las emisiones de ruido de las estaciones de carga rápida en corriente continua para vehículos eléctricos. El procedimiento de medición de ruido aplicado en esta investigación se basa en un método estandarizado, de acuerdo con el Anexo 4 del Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, que desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas [13], y la norma ISO 1996:2016 Acústica—Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental [14]. Esta normativa establece los criterios y límites aplicables para evaluar y controlar el ruido ambiental en diferentes áreas, con el fin de proteger a las personas contra la contaminación acústica, fijando los niveles máximos permitidos según el tipo de zona (residencial, industrial, sanitaria, etc.) y el periodo (día, tarde o noche).

El procedimiento de medición se ha llevado a cabo conforme a la normativa. En primer lugar, la fuente emisora de ruido debe estar conectada en el modo operativo más ruidoso posible. En el caso de las estaciones de carga rápida para vehículos eléctricos, esto implica cargar a la máxima potencia disponible. A continuación, se debe identificar la ubicación donde el nivel de ruido sea más alto. En este caso, dado que no todas las estaciones de carga rápida comparten un punto específico donde el nivel de ruido sea mayor, se realizaron mediciones en los cuatro lados. Según la normativa, se efectuaron 5 mediciones a una distancia de 1,5 m de las superficies del cargador y a 1,5 m sobre el suelo. Estas mediciones, expresadas como LAeq (dBA), se registraron durante un periodo de 10 segundos.

Por otro lado, con la estación de carga detenida, se midió el ruido de fondo en los mismos puntos. Una vez más, se realizaron 5 mediciones a una distancia de 1,5 m de las superficies del cargador y a 1,5 m sobre el suelo. Estas mediciones, también expresadas como LAeq (dBA), fueron registradas durante un periodo de 10 segundos.

2.2. Correcciones de las Mediciones de Ruido

Para garantizar que los resultados de las mediciones consideren únicamente la fuente de ruido y, por lo tanto, excluyan factores ambientales como el ruido de fondo, es necesario aplicar varios factores de corrección. Una vez registrado el ruido de fondo, se debe realizar un análisis detallado de los valores medidos para determinar qué correcciones deben implementarse, cuando sea aplicable, según la normativa. Esta sección analiza dichas correcciones y explica cómo aplicarlas a las mediciones en cada punto.

2.2.1. Correcciones por Ruido de Fondo

De acuerdo con la normativa, cuando el nivel evaluado supera el ruido de fondo en 10 dBA, no se aplica ninguna corrección. Si el nivel evaluado supera el nivel de ruido de fondo en un rango entre 3 y 10 dBA, se aplica una corrección por ruido de fondo según la siguiente ecuación (1):

$$L_{Aeq,corr} = 10 \cdot \log \left(10^{L_{Aeq}/10} - 10^{L_{Aeq,background}/10} \right) \quad (1)$$

Por otro lado, cuando el nivel evaluado no superaba el nivel de ruido de fondo en 3 dBA, la medición se descartaba y se volvía a registrar una vez que el ruido de fondo había disminuido.

2.2.2. Correcciones por Componentes Tonales Emergentes (Kt)

En este caso, se debe realizar un análisis en tercios de octava, tanto con el cargador en funcionamiento como detenido, para medir el ruido de fondo, aplicándose si procede una corrección por ruido de fondo cuando el nivel evaluado superaba el nivel de ruido de fondo en un rango entre 3 y 10 dB, según la siguiente ecuación (2):

$$L_{feq,corr} = 10 \cdot \log \left(10^{L_{feq}/10} - 10^{L_{feq,background}/10} \right) \quad (2)$$

Cuando el nivel evaluado superaba el ruido de fondo en 10 dBA, no se aplica ninguna corrección. Por el contrario, si no superaba el nivel de ruido de fondo en 3 dBA, la medición se descarta y se vuelve a registrar una vez que el ruido de fondo había disminuido.

A continuación, el componente tonal K_t se obtiene según L_t y considerando la siguiente Tabla 1:

$L_t = L_f - L_s$ donde L_f es el nivel de la banda emergente y L_s es la media aritmética de las bandas adyacentes.

Tabla 1: Componente Tonal Kt.

	Lt (dB)	Tonal Component Kt (dB)
From 20 to 125 Hz	If Lt < 8	0
	If 8 ≤ Lt ≤ 12	3
	If Lt > 12	6
From 160 to 400 Hz	If Lt < 5	0
	If 5 ≤ Lt ≤ 8	3
	If Lt > 8	6
From 500 to 10000 Hz	If Lt < 3	0
	If 3 ≤ Lt ≤ 5	3
	If Lt > 5	6

2.2.3. Correcciones debido a componentes de baja frecuencia

Una vez más, cuando el nivel evaluado excedía el nivel de ruido de fondo en 10 dBC, no se aplica ninguna corrección. En aquellas mediciones donde el nivel evaluado excede el nivel de ruido de fondo en un rango de 3 a 10 dBC, debe aplicarse la corrección debido a componentes de baja frecuencia L_{Ceq} según la siguiente Ecuación (3):

$$L_{Ceq,corr} = 10 \cdot \log \left(10^{L_{Ceq}/10} - 10^{L_{Ceq,background}/10} \right) \quad (3)$$

Por otro lado, cuando el nivel evaluado excede el ruido de fondo en 10 dBA, no se aplica ninguna corrección. Sin embargo, si el nivel evaluado excede el ruido de fondo en un rango de 3 a 10 dBA, se aplica una corrección por ruido de fondo LAeq según la siguiente Ecuación (4):

$$L_{Aeq,corr} = 10 \cdot \log \left(10^{L_{Aeq}/10} - 10^{L_{Aeq,background}/10} \right) \quad (4)$$

Entonces, el componente de baja frecuencia K_f se obtiene en función de L_f y considerando los valores establecidos en la siguiente tabla:

Tabla 2: Componente de baja frecuencia K_f

L_f (dB)	Componente de baja frecuencia K_f (dB)
If $L_f \leq 10$	0
If $10 > L_f \leq 15$	3
If $L_f > 15$	6

2.2.4. Correcciones debido a la impulsividad

Un sonido con componentes impulsivos es aquel que presenta un nivel alto de presión sonora y una duración breve. Las correcciones debido a la impulsividad siguen el mismo patrón: no se requiere ninguna corrección cuando el nivel evaluado excede el ruido de fondo en 10 dBA. Sin embargo, si el nivel evaluado excede el ruido de fondo en un rango de entre 3 y 10 dBA, se aplica una corrección según la siguiente Ecuación (5)

$$L_{Aeq,corr} = 10 \cdot \log \left(10^{L_{Aeq}/10} - 10^{L_{Aeq,background}/10} \right) \quad (5)$$

La componente impulsiva K_i se obtiene en función de L_i y considerando los valores establecidos en la siguiente Tabla 3:

$$L_i = L_{Aeq,corr,Ti} - L_{Aeq,corr,Ti} \quad (6)$$

Tabla 3: Componente impulsiva K_i

L_i (dB)	K_i (dB)
Si $L_i \leq 10$	0
Si $10 > L_i \leq 15$	3
Si $L_i > 15$	6

2.3. Estaciones de carga rápida de CC evaluadas.

Para garantizar que los resultados fueran significativos y las conclusiones consistentes, este trabajo ha requerido realizar un gran número de mediciones de ruido en estaciones de carga de corriente continua (CC) de los principales fabricantes del mercado de la Unión Europea. Por lo tanto, se seleccionó una muestra representativa de diferentes modelos de estaciones de carga actualmente disponibles en el mercado.

En el estudio se han incluido estaciones de carga rápida (50 kW), así como estaciones superrápidas (100–150 kW) y ultrarrápidas (>150 kW). Una lista de las diferentes estaciones de carga que fueron probadas puede observarse en la siguiente Tabla 4.

Tabla 4: Estaciones de carga rápida

Fabricante	Modelo	Potencia Máxima de Carga (kW)
	Rapid 50 One/Duo/Trio	50
	Rapid 60 Duo	60
Ingeteam (Spain)	Rapid 180 Duo	180
	Rapid ST 200	200
	Rapid ST 400	400
Circuitor (Spain)	Raption 50 Trio	50
	Raption 100	100
Alpitronic (Italy)	HYC 50	50
Wall Box (Spain)	Supernova 60	60
	Supernova 150	150
ABB (Switzerland)	Terra 124HC CC	120
	HP CP500 CJ	175
	V2	150
Tesla (U.S.A.)	V3	250
GSS Power (Spain)	DP-ESC-193	160

Todas estas estaciones de carga equipan conectores CCS Combo 2, que es el tipo de conector estándar para la carga rápida en la UE. Sin embargo, algunas de las estaciones de carga más antiguas, como las Ingeteam Rapid 50 Trio, ofrecen conectores Tipo 2 para carga rápida en corriente alterna trifásica (entre 11 y 43 kW), y CHAdeMO, el conector estándar de carga rápida en corriente continua para los primeros vehículos eléctricos japoneses (hasta 63 kW), que ha sido reemplazado gradualmente por CCS Combo 2 en los modelos nipones más recientes.

Independientemente de los tipos de conectores existentes en el mercado, este trabajo se centró únicamente en el ruido generado al emplear los conectores CCS, ya que la carga rápida en corriente alterna no produce emisiones de ruido significativas y el CHAdeMO no está incluido en las estaciones de carga rápida de nueva generación. Como ejemplo de estación de carga rápida de primera generación de 50 kW, con los tres tipos de conectores, puede verse a la izquierda de la Figura 1, mientras que una estación de carga rápida de última generación de 180 kW, con solo conectores CCS Combo 2, puede verse a la derecha.

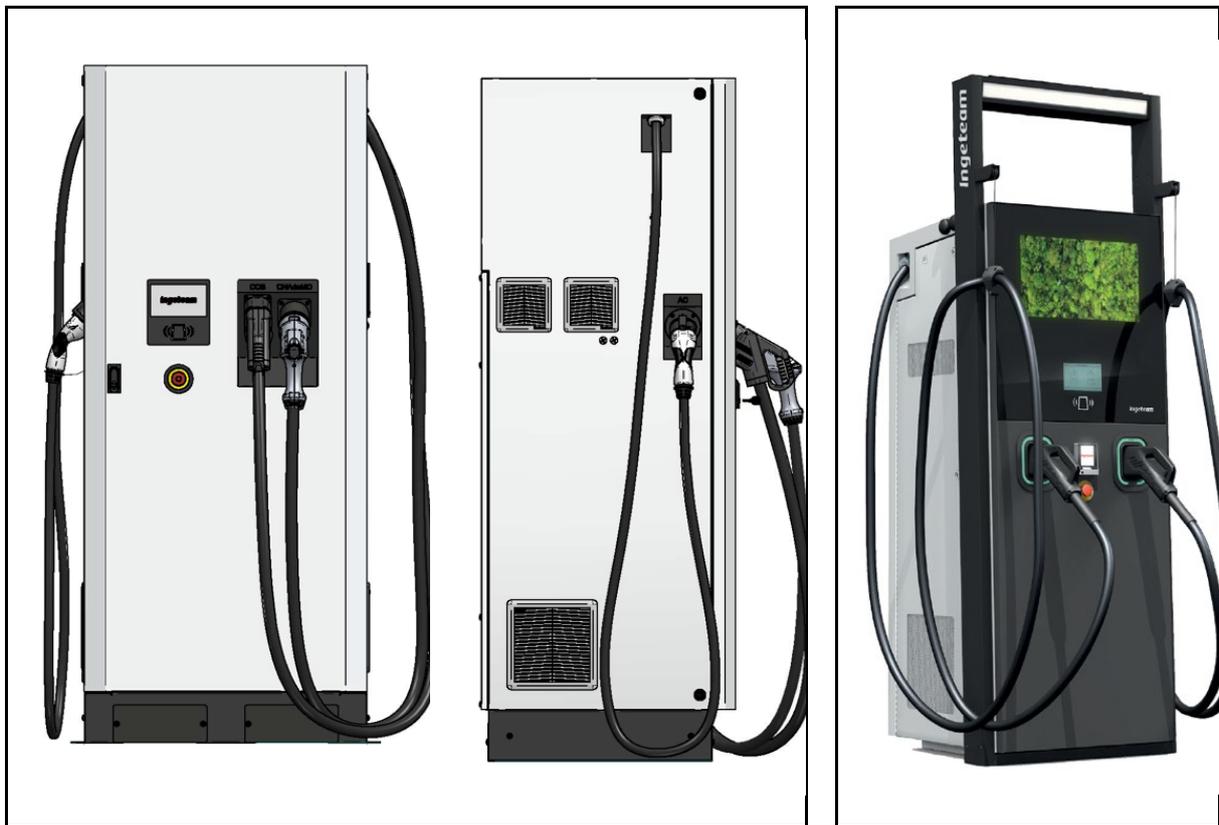


Figura 1: Estaciones de carga rápida Ingeteam Rapid 50 Trio (izquierda) e Ingeteam Rapid 180 (derecha).

2.4. Configuración de medición y disposición de los micrófonos

La configuración de medición de ruido y la disposición de los micrófonos aplicadas en esta investigación se basan en un método estandarizado, conforme al Anexo 4 del R.D. 1367/2007 y la norma ISO 1996:2016. Las mediciones de emisión de ruido se realizaron en los cuatro lados de cada estación de carga. Según la normativa, los micrófonos se colocaron a una distancia de 1,5 m de cada lado y a 1,5 m de altura desde el suelo, tal y como se muestra las Figuras 2 (vista frontal) y 3 (vista lateral).

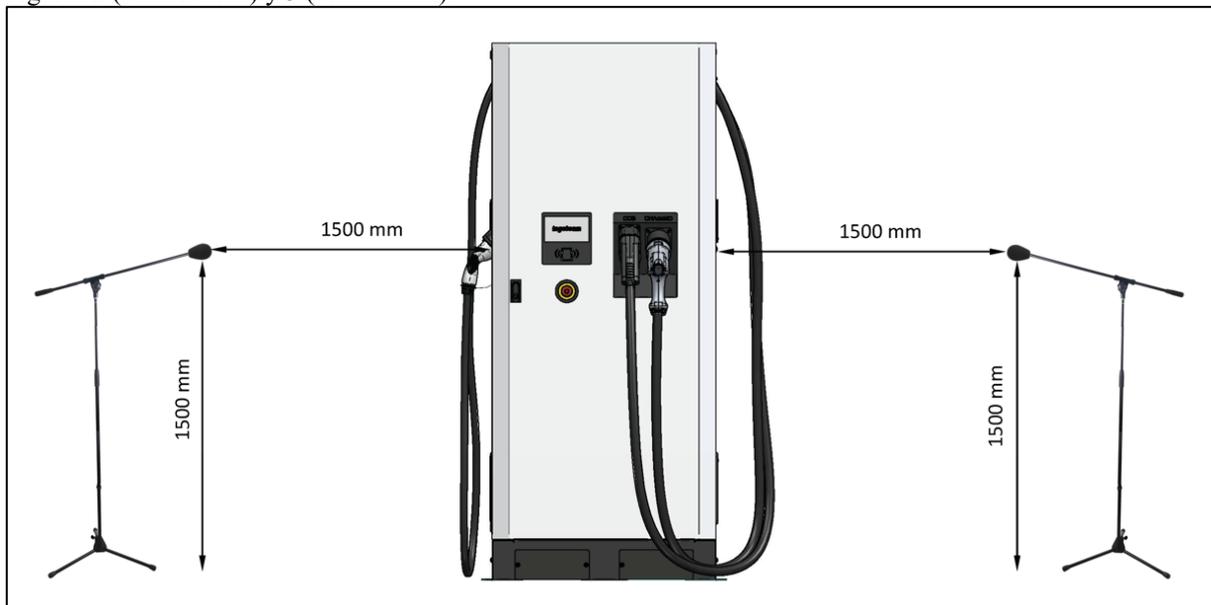


Figura 2: Configuración de los micrófonos. Vista lateral.

El registro sonoro se configuró para registrar señales de 10 s entre 80 Hz y 20 kHz con un tiempo de integración de 125 ms (Modo Fast). Todos estos datos han sido procesados en bandas de 1/3 de octava contemplando cinco mediciones para cada punto de medición, así como para el ruido de fondo.

2.5. Instrumentación y entorno acústico

La instrumentación utilizada para todas las evaluaciones de ruido, donde se requiere el uso de filtros de banda de octava o de 1/3 de octava, deben cumplir con los requisitos de precisión para Tipo 1/Clase 1, según lo especificado en la norma IEC 61260 sobre filtros de banda de octava y fracciones de banda de octava [15]. La Tabla 5 muestra una lista de todos los instrumentos de medición utilizados en este trabajo, los cuales cumplieron con este requisito.

Tabla 5: Instrumentación utilizados en las pruebas.

Instrumentación	Modelo
Analizador de presión acústica modular tipo 1	Bruel & Kjaer 2250
Analizador de presión acústica modular tipo 1	Bruel & Kjaer 2260
Calibrador de sonido para micrófonos	Bruel & Kjaer 4231
Termo-hidro-anemómetro	PCE-THA 10

Las pruebas se llevaron a cabo en condiciones reales, por lo tanto, no solo se midió el ruido durante las sesiones de carga, sino que también se registró el ruido de fondo para cada medición con el fin de calcular y aplicar la corrección correspondiente. Siguiendo la normativa, cuando el nivel evaluado no superaba en 3 dBA el nivel de ruido de fondo, la medición era descartada y se realizaban nuevas mediciones cuando el ruido de fondo se mantenía en valores válidos para el registro sonoro.

La norma ISO 9613-2, “Acústica. Atenuación del sonido durante la propagación en exteriores” [16], especifica que la velocidad del viento no debe superar los 5 m/s bajo ninguna circunstancia durante un período representativo de las condiciones meteorológicas predominantes. Este requisito fue verificado mediante mediciones realizadas con el termo-hidro-anemómetro calibrado PCE-THA 10.

Por otro lado, tal y como establece el Reglamento 1367/2007, la temperatura ambiente debe estar entre 0 y 40 °C, mientras que la humedad relativa debe situarse entre el 20 % y el 100 %. Todas las mediciones de esta investigación se registraron en un rango de temperatura entre 14 y 26 °C, y la humedad relativa estuvo entre el 42 % y el 73 %. Tanto la temperatura como la humedad fueron medidas con el termo-hidro-anemómetro calibrado PCE-THA 10.



Figura 3: Pruebas en estación Tesla V2 Supercharger 150 kW

Por otro lado, en colaboración con una de las principales redes de carga, se pudieron medir varias estaciones de carga rápida en condiciones controladas de laboratorio, con un ruido de fondo muy reducido, en el Smart Mobility Lab de Iberdrola. Este laboratorio, ubicado en Bilbao (España), cuenta con una amplia gama de estaciones de carga rápida en corriente continua y permitió realizar pruebas y mediciones bajo una variedad de variables de carga. Estas incluyeron la prueba de estaciones de carga rápida corriente continua con un dispositivo de amortiguación sonora, diseñado específicamente para reducir las emisiones de ruido que generan los cargadores de primera generación. La Figura 4 muestra las instalaciones del Smart Mobility Lab de Iberdrola.



Figura 4: Smart Mobility LAB de Iberdrola, Bilbao (España).

Resultados y análisis

En primer lugar, una vez realizado el procedimiento de medición de ruido de cada estación de carga y el ruido de fondo a su vez, se estudiaron las correcciones correspondientes según la normativa. Se calcularon los niveles de presión sonora (SPL) para cada estación de carga rápida en corriente continua, mostrándose en la Figura 5 una comparación de los valores SPL de cada cargador rápido, tanto medidos como corregidos.

De acuerdo con la normativa, los niveles de presión sonora una vez aplicadas las correcciones no deben superar los 65 dBA en ningún momento durante su funcionamiento (este límite está representado como una línea negra en la Figura 5). Sin embargo, como puede observarse en la Figura , la mayoría de los cargadores rápidos corriente continua generaron más ruido, siendo el Ingeteam Rapid de 50 kW el más ruidoso, mientras que algunos de los cargadores ultra-rápidos (>100 kW) resultaron ser más silenciosos.

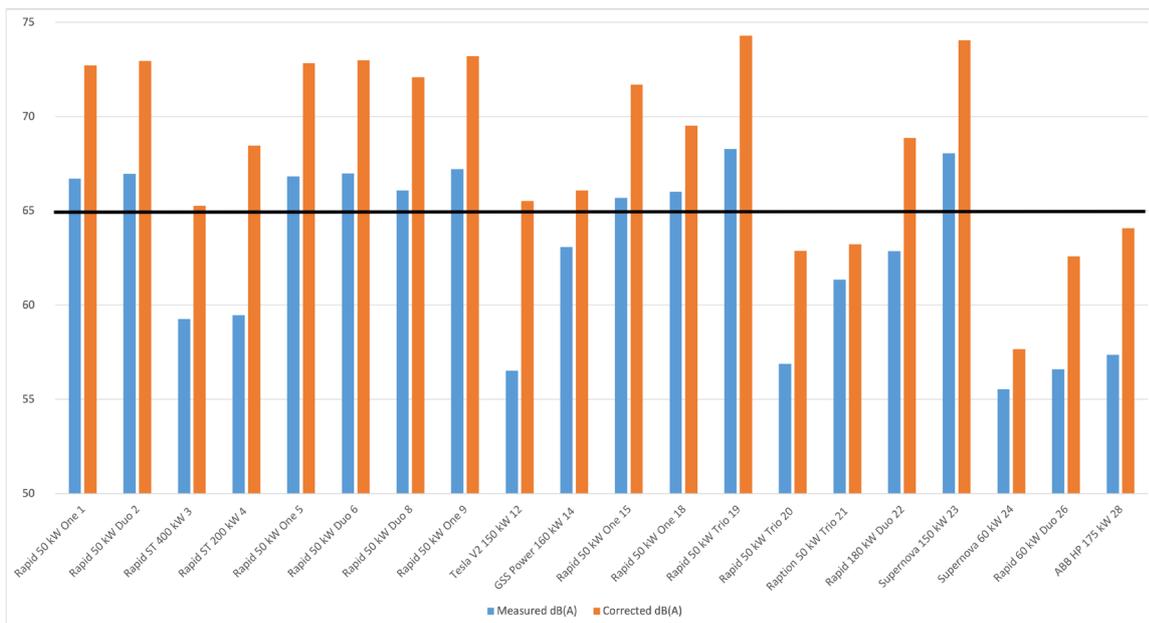


Figura 5: Niveles de presión sonora medidos y corregidos para todos los cargadores rápidos corriente continua evaluados.

Debido al alto número de estaciones de carga rápida corriente continua analizadas, y para poder compararlas de manera más detallada, se realizó un análisis frecuencial. Los resultados se presentan de manera preliminar en conjunto, lo que significa que se comparan todos los fabricantes y modelos. Esto da lugar a un gráfico generalizado que muestra el espectro de emisión de ruido de cada estación de carga como se puede observar en la siguiente Figura 6.

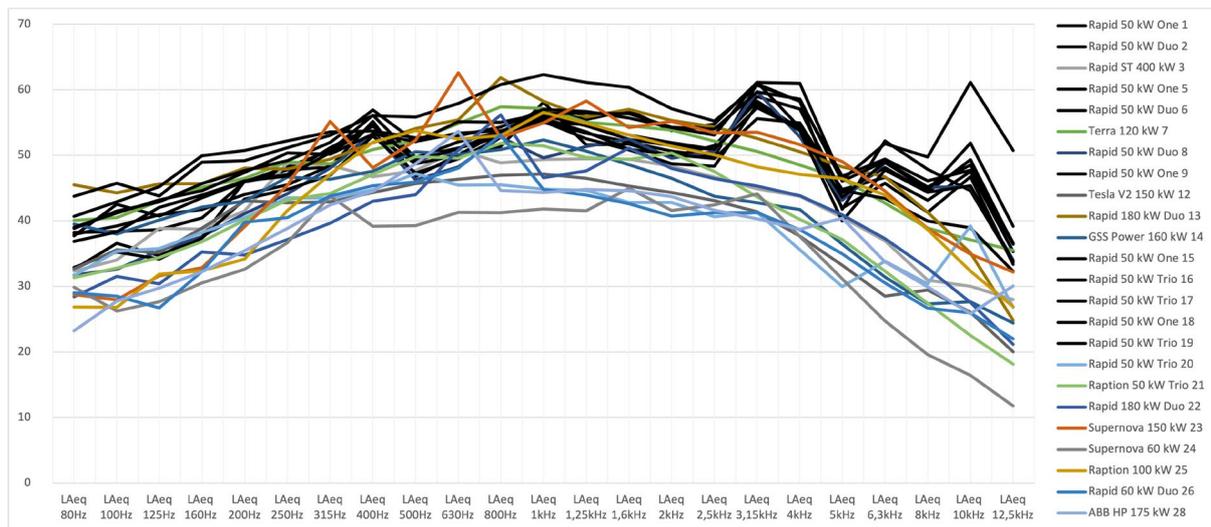


Figura 6: Espectros de emisión de ruido (dBA) para todos los cargadores rápidos corriente continua probados.

Los cargadores rápidos Ingeteam Rapid de 50 kW destacan en la parte superior del gráfico como los más ruidosos. Cabe señalar que todos ellos están representados en color negro para facilitar su identificación. Por el contrario, los cargadores de alta potencia, como el Wall Box Supernova de 150 kW, el Tesla V2 de 150 kW o el Ingeteam Rapid ST 400, son más silenciosos.

Se pueden apreciar diferencias significativas entre las emisiones de ruido de las estaciones de carga rápida de primera generación (50 kW) y las de última generación (>100 kW), ya que las primeras son mucho más ruidosas que las segundas. De hecho, solo estos cargadores rápidos de primera generación (50 kW) superan los niveles máximos de ruido permitidos para áreas residenciales establecidos en las normativas mencionadas anteriormente, mientras que las estaciones de carga rápida de última generación (>100 kW) son significativamente más silenciosas, incluyendo algunas cuyas emisiones de ruido son casi imperceptibles para los seres humanos. Esta característica se aprecia mejor en la Figura 7.

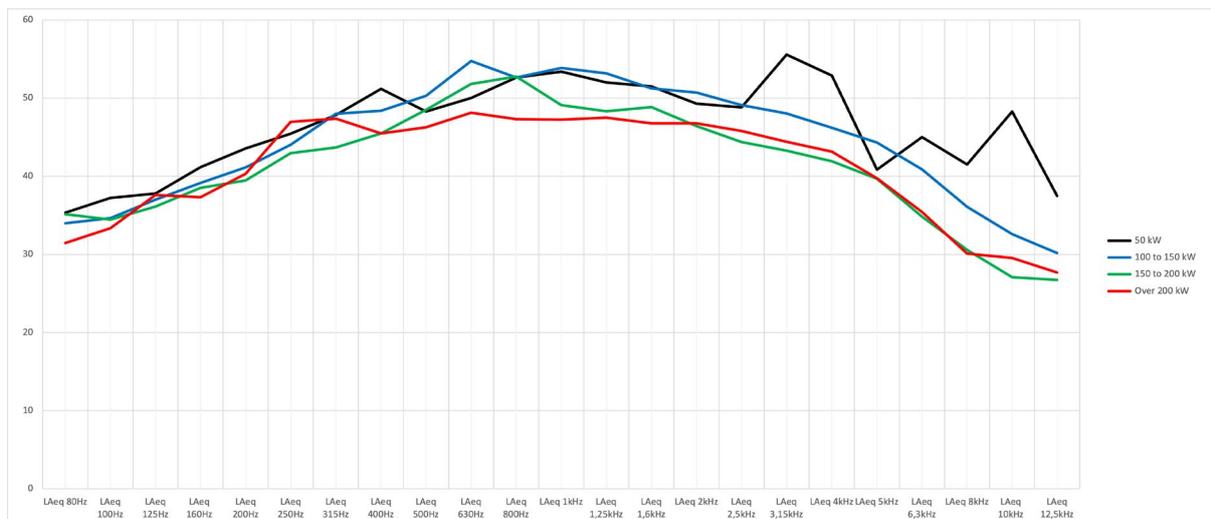


Figura 7: Espectros promedio de emisión de ruido (dBA) para los cargadores rápidos probados según su potencia nominal.

Esta última figura muestra los espectros promedio de ruido de todas las estaciones de carga rápida analizadas, clasificadas según su potencia nominal en cuatro grupos: Ingeteam Rapid de primera generación (50 kW, en negro), cargadores de 100 a 150 kW (en azul), cargadores de 150 a 200 kW (en verde) y cargadores de más de 200 kW (en rojo). El primer grupo (50 kW) presenta el espectro de ruido más alto de todos los grupos, especialmente en los rangos de alta frecuencia.

Dado que el objetivo de esta investigación es mitigar las emisiones de ruido de los cargadores rápidos corriente continua, se realizó una evaluación exhaustiva de los cargadores más ruidosos que superan los niveles máximos permitidos. En este caso, la evaluación de las emisiones de ruido no se limitó únicamente a sus espectros, sino que también se consideró su propagación. Para comenzar, se compararon los cargadores rápidos Ingeteam Rapid (50 kW) de primera generación más ruidosos, como se puede observar en la Figura 8.

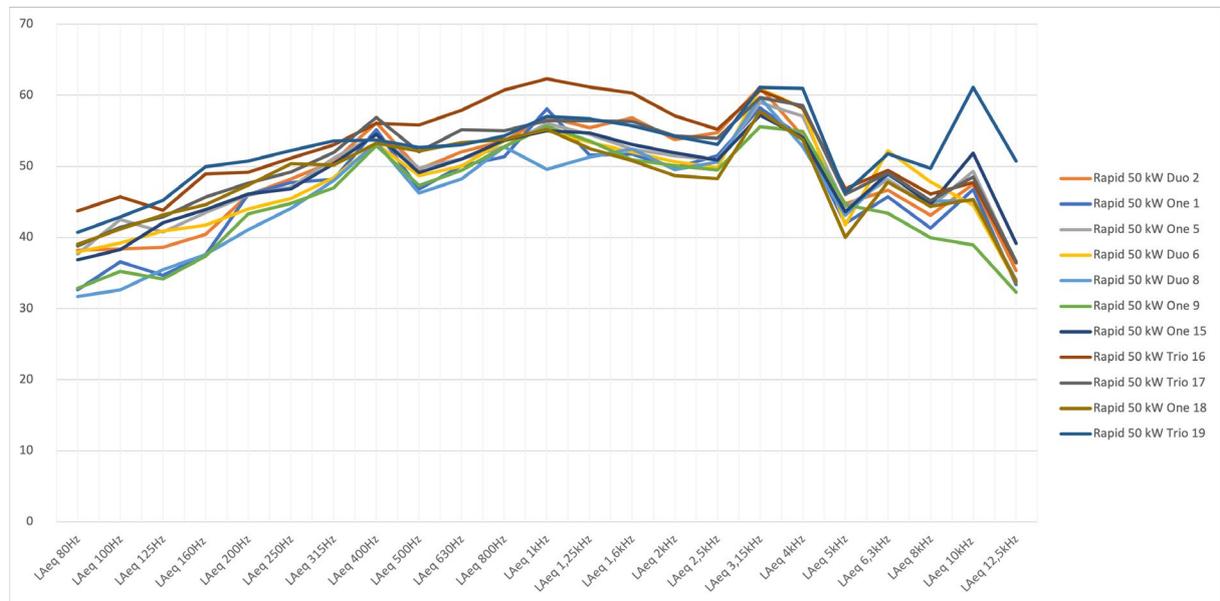


Figura 8: Comparación entre los espectros de emisión de ruido (dBA) de diferentes cargadores rápidos de primera generación Ingeteam Rapid (50 kW).

La Figura 8 muestra los espectros de emisión de ruido de diferentes cargadores rápidos Ingeteam Rapid (50 kW) de primera generación. Todos ellos presentan espectros de ruido similares, independientemente de si se trata del modelo One, Duo o Trio. Como se puede observar, los espectros de ruido muestran dos picos en frecuencias altas: el primero se encuentra alrededor de los 3150–4000 Hz, y el segundo en los 10000 Hz. Este ruido de alta frecuencia, que genera molestias a las personas, supera los límites de ruido ambiental establecidos en la normativa.

Una vez identificados los cargadores que exceden los límites de ruido establecidos por la normativa, se probaron varias formas de reducir sus emisiones sonoras. Un primer intento consistió en instalar un dispositivo de amortiguación sonora en la superficie del cargador. Este dispositivo consta de tres cubiertas metálicas: una en cada lado y otra en la parte trasera del cuerpo del cargador, rellenas con paneles de espuma absorbente de sonido de alta densidad. Este dispositivo, instalado en una estación de carga rápida Ingeteam Rapid 50 kW Trio, puede observarse en la Figura 9 siguiente.



Figura 9: Estación de carga rápida Ingeteam Rapid 50 kW con un dispositivo de amortiguación sonora.

Se registró el ruido en este cargador aislado y se comparó con varias unidades estándar del mismo fabricante y modelo en diferentes condiciones de prueba. Los resultados mostraron que, aunque el dispositivo de amortiguación sonora logró una reducción de ruido en casi todas las bandas de un tercio de octava, esta reducción fue muy limitada en la mayoría de ellas y prácticamente insignificante en las bandas de alta frecuencia, que son las que generan molestias a las personas cercanas. Esto se puede observar en la Figura 10 siguiente.

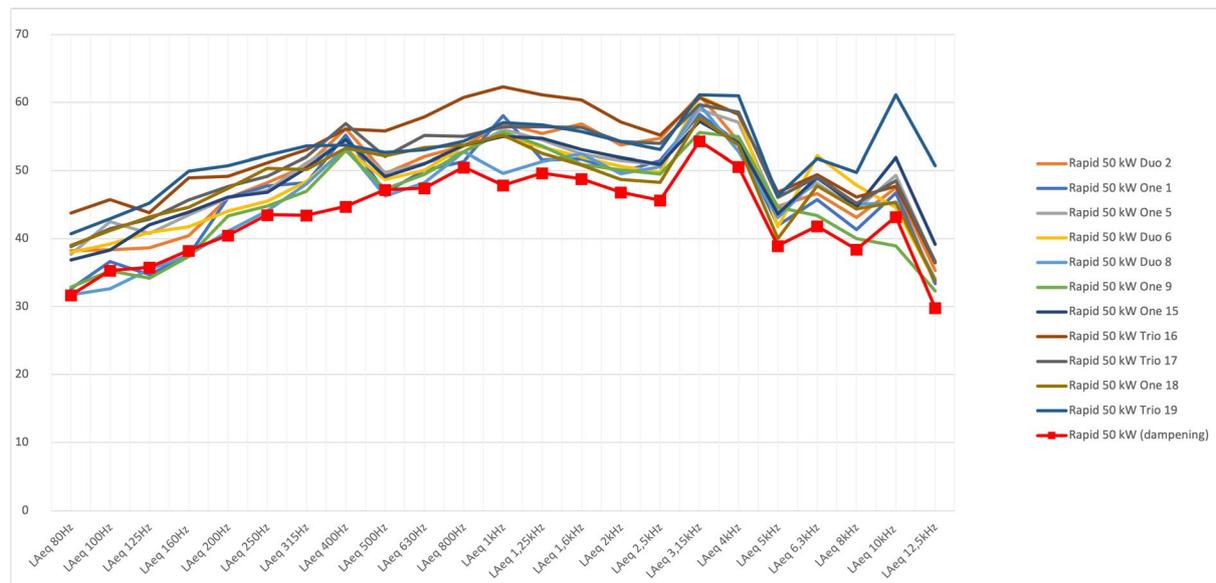


Figura 10: Espectros de emisión de ruido (dBA) de diferentes estaciones de carga rápida Ingeteam Rapid de 50 kW.

La Figura 10 muestra los espectros de ruido de todas las estaciones de carga rápida Ingeteam Rapid 50 kW analizadas en esta investigación. El Ingeteam Rapid 50 kW, con el dispositivo de amortiguación sonora instalado (línea roja con marcador cuadrado), presenta un espectro ligeramente inferior al de los cargadores que no han sido modificados. Sin embargo, esta reducción es, en la mayoría de los casos, inferior a 2 dB en frecuencias altas como 4 y 10 kHz, lo que hace que esta medida sea muy limitada, ya que dicha reducción de ruido no sería suficiente para cumplir con los límites establecidos por la normativa de ruido en la mayoría de los cargadores rápidos probados. Como se puede observar en la Figura 5, solo tres estaciones de carga rápida (Rapid ST 400 kW, Tesla V2 150 kW y GS Power 160 kW) podrían beneficiarse de esta reducción de ruido para evitar superar los 65 dBA.

Finalmente, también se evaluó la relación entre la potencia de carga y las emisiones de ruido. Aunque un cargador rápido corriente continua tiene una potencia nominal de salida, que típicamente varía entre 50 y 400 kW, la potencia real de carga depende de varios factores. Las velocidades óptimas de carga rápida solo se logran cuando el estado de carga (SoC) de la batería es bajo y está a una temperatura ideal [17,18]. Por ejemplo, si el SoC de la batería es alto—generalmente superior al 60% o si no se encuentra dentro de la temperatura ideal para carga rápida, que ronda los 40 °C, la potencia de carga puede reducirse considerablemente, especialmente cuando la batería está demasiado fría. En condiciones desfavorables, la potencia de carga rápida corriente continua puede ser tan baja como 20 kW o incluso menos.

Esta investigación también evaluó cómo la potencia de carga puede afectar las emisiones de ruido en cargadores rápidos corriente continua, ya que el ruido de alta frecuencia es emitido por la electrónica de potencia del cargador, que transforma, convierte y rectifica una corriente alterna de alto voltaje en una corriente continua entre 400 y 800 V.

Los cargadores ultra-rápidos tienen más probabilidades de operar cerca de su potencia nominal máxima en comparación con los cargadores rápidos de primera generación de 50 kW, que funcionan al 100% la mayor parte del tiempo. Sin embargo, la potencia de carga rápida corriente continua está determinada por el Sistema de Gestión de Baterías (BMS), dependiendo principalmente de la temperatura y el SoC de la batería, por lo que el usuario no puede elegir la potencia del cargador rápido corriente continua. Además, solo los cargadores rápidos corriente continua de primera generación (50 kW) superan los límites de ruido establecidos por la normativa. Por estas razones, una reducción del ruido debido a un enfoque basado en la limitación de potencia solo se consideró en los cargadores rápidos de 50 kW. Se midieron los niveles de presión sonora para diferentes potencias de carga, como se puede observar en la siguiente Tabla 6:

Tabla 6: Niveles de presión sonora en función de la potencia de carga para la estación de carga rápida Ingeteam Rapid 50 kW.

Potencia de carga (kW)	50	45	40	35	30	25
Nivel de presión sonora (dBA)	74.2	73.6	71.8	68.6	63.9	58.8

La Tabla 6 muestra la relación entre la potencia de carga y la emisión de ruido para la estación de carga rápida Ingeteam Rapid de 50 kW. Ha de tenerse en cuenta que los valores mostrados son niveles de presión sonora, con las correcciones correspondiente de acuerdo con la normativa a aplicar. Como se puede observar, los niveles de

presión sonora disminuyen, de manera no proporcional, cuando se reduce la potencia de carga. Si la potencia de carga se reduce a la mitad de la potencia nominal de la estación (es decir, de 50 a 25 kW), las emisiones de ruido disminuyen en 15 dBA. Para reducir significativamente las emisiones de ruido del cargador y cumplir con los límites establecidos por la normativa, la potencia de carga no debería superar los 30 kW.

Conclusiones.

Como se explicó en la sección anterior, se han probado tres estrategias para reducir las emisiones de ruido de los cargadores rápidos. En primer lugar, se instaló un dispositivo de amortiguación acústica en la superficie del cargador. Este dispositivo mejoró ligeramente las emisiones de ruido, reduciéndolas en algunas frecuencias. Sin embargo, esta reducción fue muy limitada tanto en las bandas de alta frecuencia (4 y 10 kHz), que son las frecuencias que más molestan a las personas, como en el nivel de presión sonora equivalente general, que es el valor considerado en la normativa y que, en la mayoría de los casos, se superaría incluso con el dispositivo de amortiguación acústica instalado. De hecho, como puede observarse en la información proporcionada en las Figuras 6 y 10, el Ingeteam Rapid de 50 kW, que es el modelo de cargador rápido más ruidoso, no lograría una reducción suficiente del ruido para cumplir con los requisitos de la normativa. Además, esta solución resulta bastante costosa si se tienen en cuenta los resultados obtenidos, la relación coste/beneficio y al compararla con otras medidas de reducción de ruido.

Por otro lado, la propagación del sonido del cargador demostró que el lado frontal era el más silencioso, mientras que el resto de los lados registraron emisiones de ruido similares. Aunque este hallazgo podría ayudar a orientar el cargador para reducir las molestias, la efectividad de esta medida es muy limitada, ya que solo hay un "lado silencioso", y existen aspectos como la orientación de la pantalla del dispositivo o la posición óptima de los cables que podrían ser más restrictivos al considerar la orientación del cargador.

Finalmente, esta investigación ha evidenciado que existe una relación entre la potencia de carga y las emisiones de ruido. Reducir la potencia de salida del cargador no solo ha demostrado ser la forma más efectiva de reducir las emisiones de ruido, sino también la opción más rentable entre las tres estrategias consideradas. Sin embargo, este método solo logra una reducción significativa del ruido si se limita la potencia de salida a 30 kW.

La carga en corriente alterna de la mayoría de los vehículos eléctricos está limitada a 11 kW, mientras que la carga rápida en corriente continua puede variar entre 50 y 400 kW. Esta investigación ha demostrado que las estaciones de carga rápida de última generación, cuya potencia de salida supera los 100 kW, no representan un problema en términos de emisiones de ruido, mientras que los cargadores rápidos de primera generación de 50 kW exceden los límites de ruido establecidos por la normativa. Por esta razón, para mitigar las emisiones de ruido de estos cargadores y, en consecuencia, reducir las molestias a las personas, se sugiere implementar una limitación basada en software que reduzca la potencia de carga a 30 kW en los cargadores ya instalados cerca de zonas residenciales.

Esta potencia sigue siendo prácticamente tres veces más rápida que la carga en corriente alterna, lo cual, si se establece una estrategia de precios interesante, puede ser una opción atractiva para los usuarios de vehículos eléctricos que puedan planificar una sesión de carga entre 1 y 3 horas mientras realizan tareas rutinarias como hacer la compra semanal, ir al cine o almorzar. Además, este tipo de carga a potencia media provoca menos degradación en la batería que la carga a alta potencia. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la eficiencia del cargador se reduce considerablemente si opera por debajo del 85% de su capacidad máxima, por lo que esta medida solo debería aplicarse en casos donde no existan mejores alternativas para evitar quejas por parte de los residentes cercanos.

Finalmente, se sugiere que los equipos ruidosos de primera generación de 50 kW, que ya han sido adquiridos por los operadores de puntos de carga y que aún están pendientes de instalación, se ubiquen en paradas de autopista donde no causen molestias, junto a cargadores más rápidos (100–400 kW). De este modo, los clientes pueden elegir entre diferentes velocidades de carga según sus necesidades.

De manera similar, se recomienda evitar la instalación de estaciones de carga rápida ruidosas cerca de áreas urbanas, donde sus emisiones de ruido no pueden ser mitigadas a menos que su potencia de salida se limite significativamente. Sin embargo, esto a menudo no es económicamente viable, ya que existen muchas estaciones de carga en corriente alterna de 11 e incluso 22 kW que son prácticamente silenciosas.

Este trabajo ha sido financiado por las ayudas a proyectos de investigación de la Universidad Miguel Hernández correspondientes al año 2024.

Agradecimientos: Los autores agradecen el apoyo proporcionado por los miembros del Laboratorio de Vehículos de la UMH y el equipo del Smart Mobility Lab de Iberdrola en Larraskitu, Bilbao (España).

- [1] Collin, R.; Miao, Y.; Yokochi, A.; Enjeti, P.; von Jouanne, A. Advanced Electric Vehicle Fast-Charging Technologies. *Energies* 2019, 12, 1839. <https://doi.org/10.3390/en12101839>.
- [2] Hamednia, N.; Murgovski, J.; Fredriksson, J.; Forsman, M.; Pourabdollah; Larsson, V. Optimal Thermal Management, Charging, and Eco-Driving of Battery Electric Vehicles. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2023, 72, 7265–7278. <https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3240279>.
- [3] Baltazar, J.; Vallet, F.; Garcia, J. A model for long-distance mobility with battery electric vehicles: A multi-perspective analysis. *Procedia CIRP* 2022, 109, 334–339. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.259>.
- [4] Campello-Vicente, H.; Peral-Orts, R.; Campillo-Davo, N.; Velasco-Sanchez, E. The effect of electric vehicles on urban noise maps. *Appl. Acoust.* 2017, 116, 59–64. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.09.018>.
- [5] Mastoi, M.S.; Zhuang, S.; Munir, H.M.; Haris, M.; Hassan, M.; Usman, M.; Bukhari, S.S.H.; Ro, J.-S. An in-depth analysis of electric vehicle charging station infrastructure, policy implications, and future trends. *Energy Rep.* 2022, 8, 11504–11529. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.011>.
- [6] Leijon, J.; Boström, C. Charging Electric Vehicles Today and in the Future. *World Electr. Veh. J.* 2022, 13, 139. <https://doi.org/10.3390/wevj13080139>.
- [7] Kogan, P.; Arenas, J.P.; Bermejo, F.; Hinalaf, M.; Turra, B. A Green Soundscape Index (GSI): The potential of assessing the perceived balance between natural sound and traffic noise. *Sci. Total Environ.* 2018, 642, 463–472. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.023>.
- [8] World Health Organization. Regional Office for Europe. Burden of Disease from Environmental Noise: Quantification of Healthy Life Years Lost in Europe. 2011. Available online: <https://iris.who.int/handle/10665/326424> (accessed on Nov. 2024).
- [9] Riedel, N.; van Kamp, I.; Dreger, S.; Bolte, G.; Andringa, T.; Payne, S.R.; Schreckenber, D.; Fenech, B.; Lavia, L.; Notley, H.; et al. Considering ‘non-acoustic factors’ as social and environmental determinants of health equity and environmental justice. Reflections on research and fields of action towards a vision for environmental noise policies. *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.* 2021, 11, 100445. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100445>.
- [10] Mitchell, A.; Erfanian, M.; Soelistyo, C.; Oberman, T.; Kang, J.; Aldridge, R.; Xue, J.-H.; Aletta, F. Effects of Soundscape Complexity on Urban Noise Annoyance Ratings: A Large-Scale Online Listening Experiment. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19, 14872. <https://doi.org/10.3390/ijerph192214872>.
- [11] van Kamp, I.; Davies, H. Noise and health in vulnerable groups: A review. *Noise Health* 2013, 15, 153–159. <https://doi.org/10.4103/1463-1741.112361>.
- [12] Waye, K.P.; Bengtsson, J.; Rylander, R.; Hucklebridge, F.; Evans, P.; Clow, A. Low frequency noise enhances cortisol among noise sensitive subjects during work performance. *Life Sci.* 2002, 70, 745–758. [https://doi.org/10.1016/S0024-3205\(01\)01450-3](https://doi.org/10.1016/S0024-3205(01)01450-3).
- [13] Real Decreto 1367/2007, de 19 de Octubre, por el que se Desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de Noviembre, del Ruido, en lo Referente a Zonificación Acústica, Objetivos de Calidad y Emisiones Acústicas. 2007. Available online: <https://www.boe.es/buscar/pdf/2007/BOE-A-2007-18397-consolidado.pdf> (accessed on Nov. 2024).
- [14] ISO 1996:2016; Acoustics—Description, Measurement and Assessment of Environmental Noise. Part 1: Basic Quantities and Assessment Procedures and Part 2: Determination of Sound Pressure Levels. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2016.
- [15] IEC 61260-1:2014; Electroacoustics—Octave-Band and Fractional-Octave-Band Filters—Part 1: Specifications. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2014.
- [16] ISO 9613-2; Acoustics—Attenuation of Sound During Propagation Outdoors—Part 2: General Method of Calculation. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1996.
- [17] Motoaki, Y.; Yi, W.; Salisbury, S. Empirical analysis of electric vehicle fast charging under cold temperatures. *Energy Policy* 2018, 122, 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.07.036>.
- [18] Wang, Y.; Zhang, X.; Chen, Z. Low temperature preheating techniques for Lithium-ion batteries: Recent advances and future challenges. *Appl. Energy* 2022, 313, 118832. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118832>.
- [19] Suarez, C.; Martinez, W. Fast and Ultra-Fast Charging for Battery Electric Vehicles—A Review. In Proceedings of the 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA, 29 September–3 October 2019; pp. 569–575. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2019.8912594>.

- [20] Tu, H.; Feng, H.; Srdic, S.; Lukic, S. Extreme Fast Charging of Electric Vehicles: A Technology Overview. *IEEE Trans. Transp. Electrification* 2019, 5, 861–878. <https://doi.org/10.1109/TTE.2019.2958709>. Zhang, Z.; Min, H.; Yu, Y.; Cao, Q.; Li, M.; Yan, K. An optimal thermal management system heating control strategy for electric vehicles under low-temperature fast charging conditions. *Appl. Therm. Eng.* 2022, 207, 118123. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118123>.