TECNIACUSTICA ELCHE · 2022

53º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
XII CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA

LA ELECTRIFICACIÓN DEL TRANSPORTE COMO CATALIZADOR DE CAMBIO DEL PAISAJE SONORO

PACS: 43.50.Rq

Barti Domingo, Robert
robardom@hotmail.com
619983384

Palabras Clave: motor eléctrico, eficiencia, bajo ruido, silencioso, confort sonoro

ABSTRACT.

The electric drives are very quiet. Ambient noise in cities is expected to benefit from transport electrification. However, electric vehicles are so quiet in today's environments that they are not audible. This poses a risk to blind people who are nearby, who cannot hear the vehicle. In order to avoid this problem, the EU has decided to apply the AVAS system to all electric vehicles. This system generates artificial noise for speeds below 20 km/h, and with sound levels below 75 dBA. These new sounds, which we are not used to, represent a remarkable novelty in the urban soundscape, in the near future. This communication sets out the forecasts for noise levels when the car fleet is 100% electric and the new problem that AVAS systems are going to generate in the very near future will be addressed.

RESUMEN.

Los propulsores eléctricos, son muy silenciosos. Se espera que el ruido ambiente en las ciudades se beneficie de la electrificación del transporte. Sin embargo, los vehículos eléctricos resultan tan silenciosos en los ambientes actuales, que no se detectan auditivamente. Esto supone un riesgo para las personas invidentes que estén en las cercanías, que no pueden escuchar al vehículo. Para evitar este problema, la UE ha resuelto aplicar el sistema AVAS a todos los vehículos eléctricos. Este sistema genera un ruido artificial para velocidades inferiores a los 20 Km/h, y con unos niveles sonoros inferiores a los 75 dBA. Estos nuevos sonidos, a los que no estamos acostumbrados, suponen una novedad destacable en el paisaje sonoro urbano, en un futuro próximo. En esta comunicación se exponen las previsiones de los niveles sonoros cuando el parque automovilístico sea el 100% eléctrico y se abordará el nuevo problema que los sistemas AVAS van a generar en un futuro muy cercano.

1. INTRODUCCIÓN.

Los vehículos con propulsión eléctrica en la circulación urbana, ya sean híbridos o eléctricos, permiten reducir drásticamente la contaminación que generan los vehículos con motor de combustión interna (MCI). A nivel acústico, el propulsor actual basado en combustible fósil, es una de las fuentes de ruido, que se elimina con la incorporación del propulsor eléctrico. Esto abre las esperanzas a que el ruido ambiental, debido al tráfico rodado en las ciudades, que se ha mantenido casi constante durante las dos últimas décadas, finalmente se reduzca. Los niveles máximos de ruido permitidos por los vehículos automóviles en la UE, se definieron en la Directiva 96/20/CE que ha permanecido inalterada en 74 dBA para los coches, desde el año 1995. El reglamento 540/2014, modifica la Directiva 2007/46/CE estableciendo unos nuevos límites máximos de ruido que pasan de 74 dBA a 69 dBA previsto en tres fases que terminan el 2024. Los vehículos con propulsión eléctrica aportan muchas ventajas. A nivel acústico, el propulsor no emite ruido (digamos que éste es muy bajo), el motor eléctrico es de cero emisiones de partículas, y además presenta unas ventajas mecánicas muy notables, como un rendimiento superior al MCI y un par motor superior. Esto hace que los vehículos eléctricos se consideren en general, más respetuosos con el medio ambiente.

El propulsor eléctrico ofrece una serie de ventajas interesantes: es totalmente silencioso, tiene un funcionamiento equilibrado y carente de vibraciones, un rendimiento superior al motor de combustión interna (MCI), un par motor muy superior a igualdad de potencia que un MCI, no emite gases, y su mantenimiento es nulo. Mecánicamente las ventajas son muy interesantes. En todo caso su elevado par motor, permite usar cajas de cambio con pocas relaciones. La figura 1, muestra la eficiencia comparativa entre distintos vehículos en base a la distancia que se puede recorrer con 1 KW/h [3].

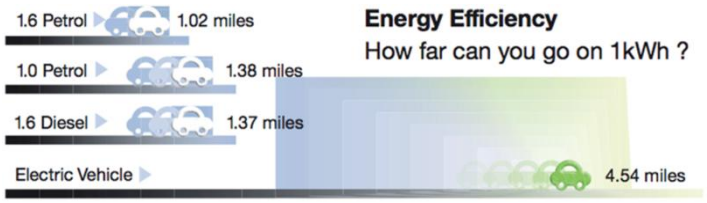

Figura 1. Eficiencia del ME frente a los MCI diesel o gasolina.

Un depósito de 50 l de gasolina, proporciona aproximadamente una energía de 1.730 MJ, mientras que una batería de 80 KW/h proporciona 288 MJ. No obstante la eficiencia real del motor MCI se sitúa en un 33%, mientras que para un eléctrico es de un 92%. Esto da una autonomía a velocidad constante de 120 Km, para el MCI de unos 780 Km, mientras que para el eléctrico es de 340 Km. Es evidente que el rendimiento del eléctrico es muy superior, pero el problema es el almacenamiento de la energía eléctrica, que limita la autonomía y el tiempo de recarga excesivo, si no queremos abusar de las recargas ultrarrápidas que acortan la vida de la batería. La llegada de las energías limpias en base al hidrógeno, pueden ser una solución. Desde el punto de vista acústico, la ausencia de vibraciones y de ruido del motor eléctrico, lo hacen especialmente atractivo. Los vehículos eléctricos son muy silenciosos en circulación urbana, y sólo radian ruido los neumáticos. En general los vehículos eléctricos tienen una sección de neumático similar, a los vehículos equivalentes con MCI.

2. FUENTES DE RUIDO EN UN VEHÍCULO CON MCI.

Los vehículos automóviles con propulsores MCI, tienen multitud de fuentes de ruido, que emiten sonido al exterior. Las principales son, el motor incluyendo el escape y la admisión, los neumáticos, el ruido aerodinámico y la transmisión. La fuente de ruido dominante depende de la velocidad del vehículo y de las condiciones de circulación. Para velocidades inferiores a los 40 Km/h aproximadamente, domina el grupo motor, mientras que para velocidades superiores el ruido de neumático se hace cada vez más importante, y por encima de los 80 Km/h empieza a destacar el ruido aerodinámico. En condiciones de circulación como subir una pendiente, es necesaria más potencia del motor para desplazar al vehículo, y por tanto el ruido del propulsor es la fuente sonora más importante, salvo en subidas con poca pendiente en circulación por vías rápidas.

La circulación urbana tiene restringida la velocidad máxima de los vehículos, estableciendo en general, los límites de 30, 50 Km/h para las vías urbanas, y los 80 Km/h para las vías de circunvalación. La situación más frecuente en entornos urbanos es la arrancada de los vehículos cuando están parados en un semáforo o un cruce. En este proceso, el ruido del grupo motriz destaca notablemente durante el proceso de inicio de marcha, radiando energía de baja frecuencia, que no puede ser absorbida por los elementos constructivos cercanos. Esta energía de baja frecuencia, puede entrar con facilidad en las viviendas, generando niveles sonoros que pueden llegar a ser molestos. En las vías más rápidas (80 Km/h), o cuando la circulación es fluida a 50 Km/h, se tiende a utilizar marchas largas. Esto reduce el régimen de giro del motor, que a su vez reduce el nivel de ruido radiado, y en consecuencia domina el ruido de neumático. Las componentes de baja frecuencia radiadas por el grupo motor, están relacionadas con el tipo de motor y su régimen de giro.

Los motores de combustión interna (MCI), disponen de unos cilindros que efectúan un movimiento lineal, que mediante el cigüeñal se pasa a un movimiento rotatorio. Este mecanismo genera fuertes vibraciones que se traducen en ruido. Por otro lado tanto la aspiración de aire, como sobre todo el escape de los gases quemados, producen niveles de

ruido muy notables. En los propulsores de 4 cilindros y 4 tiempos, que son los más usuales en el parque automovilístico, el sonido generado es de tipo tonal con dominio del llamado segundo orden motor. El margen de frecuencias radiado en ciudad en general, va de los 30 Hz al ralentí, hasta los 100 Hz aproximadamente que corresponde a las 3.000 r.p.m. Esta energía de baja frecuencia dificulta la comunicación verbal entre las personas a pie de calle, entre otros efectos no deseables. El sonido característico de los vehículos con MCI que todas las personas tenemos interiorizado, es de un sonido con una componente tonal de muy baja frecuencia, que está modulada en frecuencia, con ligeras variaciones de su amplitud, a medida que el vehículo acelera. Otra característica, es el uso del cambio de marchas, que hace que las modulaciones de frecuencia, se repitan sucesivamente cuando el vehículo acelera.

3. FUENTES DE RUIDO EN UN VEHÍCULO CON ME.

El vehículo eléctrico es igual al MCI, pero el propulsor es eléctrico. Esto conlleva varios cambios que simplifican la mecánica. No es necesario embrague, puesto que el régimen de giro del motor se controla electrónicamente desde 0 r.p.m. No llevan cambio de marchas, no precisan de sistemas de escape ni entrada de aire, tampoco de radiadores de agua, de aceite, etc. Es decir hay muchos menos elementos mecánicos, lo que se traduce en una disminución significativa del peso asociado al propulsor y del volumen ocupado. Siendo el rendimiento del orden del 90-95%, las pérdidas por calor, son mucho menores.

El motor eléctrico usado en automoción es del tipo “brushless” y cuando gira emite un nivel de ruido muy bajo, sólo medible en cámara anecoica o reverberante, que en entorno urbano es totalmente despreciable. El motor eléctrico tiene dos partes fundamentales: el estator, donde van alojadas las bobinas que generan un campo magnético rotatorio, y el rotor, que es el elemento que interactúa con el campo magnético rotatorio generado por el estator, y que va a “seguir” girando a la misma velocidad y que propulsa al vehículo. Tenemos pues una parte móvil perfectamente equilibrada que gira sobre su eje longitudinal. Esta configuración hace que no se produzcan vibraciones y por tanto no hay ruido, salvo el producido por los cojinetes que mantienen al eje en su posición, y pequeñas desalineaciones o excentricidades del campo magnético.

Sin embargo, la corriente que se aplica a las bobinas del motor eléctrico, están controladas por un sistema electrónico que aplica una señal eléctrica que hace vibrar a éstas, y se produce un ligero zumbido, que puede ser más o menos perceptible en algunos modelos. Estas señales tienen relación con el régimen de giro del motor, y suelen ser componentes tonales de frecuencias medias. Estos sonidos pueden pasar totalmente desapercibidos, cuando un vehículo eléctrico circula entre otros vehículos con MCI. Al margen del motor eléctrico que no emite sonido apreciable, el vehículo eléctrico también tiene un ruido de neumático y aerodinámico, como los vehículos con MCI.

En este sentido, a determinadas velocidades y condiciones de circulación, el ruido de un vehículo eléctrico puede ser muy similar a uno con MCI. Donde se observa mayor diferencia es en el arranque del vehículo de parado. El ruido emitido por un vehículo eléctrico sólo es perceptible en entornos relativamente silenciosos, es decir suficientemente alejado de la presencia de vehículos con MCI. Sin embargo, la actividad humana puede llegar a enmascarar estos sonidos, creándose situaciones de peligro con las personas invidentes. Por este motivo, y cediendo a las presiones de la National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), la UE ha adoptado la decisión de que los vehículos eléctricos emitan un sonido que permita detectarlos acústicamente, cuando circulan a velocidades inferiores a los 20 Km/h, aunque no haya nadie a su alrededor.

4. COMPARATIVA MCI – ME.

Con una circulación respetuosa, evitando aceleraciones bruscas, el ruido radiado por ambas motorizaciones es muy similar para velocidades superiores a los 30 Km/h. La figura 2 muestra una gráfica donde se visualizan los niveles sonoros radiados por vehículos con MCI y ME. Cabe destacar que la función “start stop” que llevan una parte de los vehículos que circulan por las ciudades actualmente, puede bajar ligeramente el nivel de los MCI a velocidades inferiores a los 20 Km/h [4], [5].

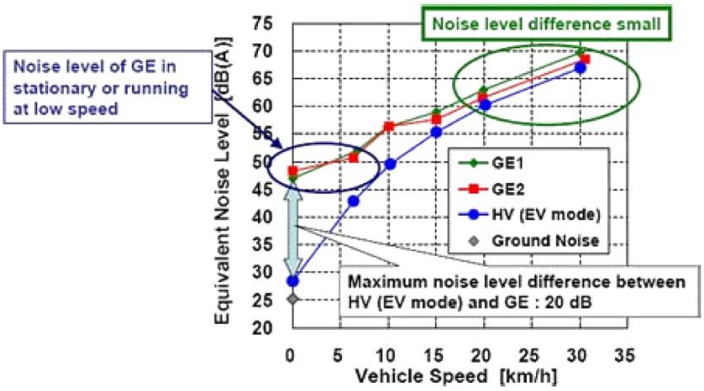

Figura 2. Comparación entre el ruido emitido por vehículos con MCI y con ME.

A nivel espectral, el nivel de ruido en un entorno urbano para vehículos con MCI y ME, se muestra en la figura 3. La gráfica en rojo muestra los niveles espectrales para los vehículos con MCI, con predominio de vehículos sin la función “stop-start”. Podemos observar el primer pico a la izquierda, donde se encuentra el primer orden motor, y que oscila entre las bandas de 31,5 Hz y 100 Hz, que se corresponde con un régimen de giro de 900 r.p.m. y 3.000 r.p.m. respectivamente. Esto incluye a los vehículos parados cuando inician su marcha y incrementan las r.p.m del motor, y los que pasan a velocidad constante. Se observa también el segundo pico, centrado en la banda de 1 KHz, producido por el ruido de los neumáticos.

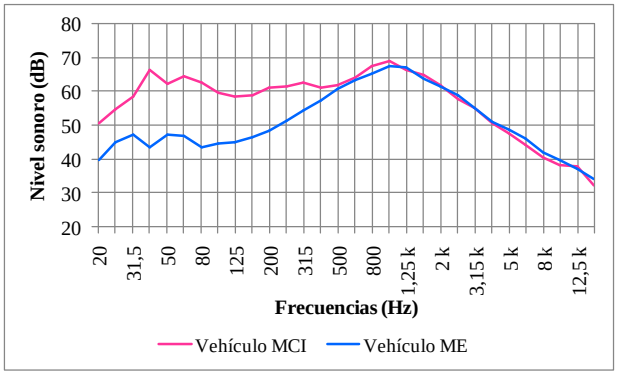

Figura 3. Perfil espectral medio del ruido de vehículos con MCI y ME a 50 Km/h.

La gráfica de color azul muestra el espectro para los vehículos con ME. En este caso solo aparece un pico, el correspondiente al ruido de neumáticos y que es prácticamente igual al de los vehículos con MCI. La gran diferencia está en la ausencia de baja frecuencia de los vehículos con ME. Los dos picos que aparecen a la izquierda, son del ruido de fondo, producido por vehículos con MCI e industria lejanos. El nivel de presión sonora correspondiente al gráfico de la figura 3, se muestra en la tabla 1.

VEHÍCULO	Leq dBA
Coche MCI	74,7
Coche ME	73,8
Ruido residual	43,4

Tabla 1. Niveles sonoros radiados por vehículos con MCI y con ME, parados en semáforo, arrancada y a una velocidad de 50 Km/h.

Para una reducción de la velocidad de los vehículos de 50 Km/h a 30 Km/h que es la tendencia en circulación urbana, los niveles de baja frecuencia se mantienen, puesto que los vehículos tienen que arrancar igualmente de parado, pero los niveles procedentes de los neumáticos se reduce unos 6 dBA, como muestra la figura 4. La frecuencia radiada por los neumáticos se centra en la banda de 1 KHz, por lo que esta reducción afecta directamente al nivel expresado en dBA.

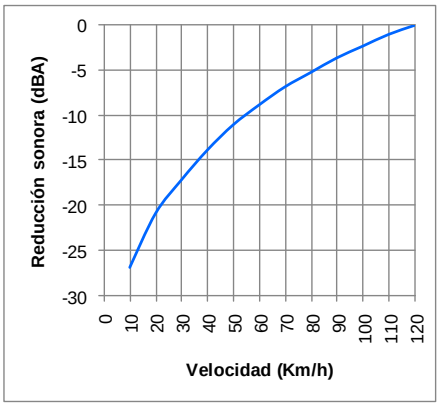

Figura 4. Relación entre la velocidad y el nivel de ruido emitido por un neumático comercial.

La reducción del nivel sonoro al pasar de vehículos con MCI a ME a 50 Km/h es de apenas 1 dBA. La sensación sonora percibida “in situ”, no coincide con la reducción de nivel sonoro. Ocurre algo similar con la sonoridad del asfalto poroelástico, donde el nivel sonoro se reduce unos 3 dBA, pero la sensación percibida tampoco coincide. En ambos casos la sensación percibida es que la reducción del nivel sonoro ha sido superior. Hay diversas causas que explican este fenómeno. En primer lugar, temporalmente se producen tres situaciones distintas con diferente nivel y calidad sonora. Inicialmente, los vehículos con MCI parados emiten baja frecuencia, con valores entre 54 y 57 dBA (sin usar la función start-stop). El sonido del ralentí de los vehículos modernos se percibe ligeramente, o no, dependiendo del nivel de ruido ambiente. Seguidamente se produce la arrancada del vehículo. En esta situación la energía de baja frecuencia sube notablemente, y el ruido de neumático no es aún apreciable. Finalmente, se produce el paso de vehículos a una velocidad constante, donde el ruido de los neumáticos domina la escena sonora. En función de la duración de cada fase, el nivel sonoro conjunto puede variar. Por otro lado el uso de la ponderación A, con los niveles sonoros habituales penaliza en exceso la baja frecuencia y no refleja la sensación percibida.

Otros trabajos [1] obtienen resultados similares, y demuestran que el ruido emitido por los vehículos eléctricos a velocidades de 30 Km/h, es notablemente inferior al de los vehículos con MCI, como muestra la tabla 2.

Vehículo	Velocidad constante (Km/h)	Nivel sonoro (dBA)
Eléctrico 1	30	57
Eléctrico 2	30	57,5
Eléctrico 3	30	58
Gasolina 1	30 (2ª marcha)	59
Gasolina 2	30 (2ª marcha)	60,5
Gasolina 3	30 (2ª marcha)	61,5
Diesel	30 (2ª marcha)	62,5

Tabla 2. Niveles sonoros radiados por vehículos con propulsor MCI y ME a una velocidad constante de 30 Km/h.

5. DETECCIÓN SONORA DE LA PRESENCIA DE UN VEHÍCULO.

La circulación de vehículos silenciosos en entornos urbanos, crea problemas entre las personas que se encuentran en las proximidades y que se guían por el sonido, para saber si hay un vehículo cerca. El aumento de colisiones entre peatones y bicicletas o patinetes, se produce porque los primeros no se percatan de la presencia de los segundos. Este problema se agrava para las personas sin visión. Para tratar de dar una solución a este problema, se han realizado muchos estudios, tratando de comparar la facilidad de detección sonora, entre vehículos con MCI y con ME. En estas pruebas intervienen personas con discapacidad visual, que tratan de detectar el sonido de un vehículo que se aproxima a su posición. El parámetro que se mide es el tiempo de detección.

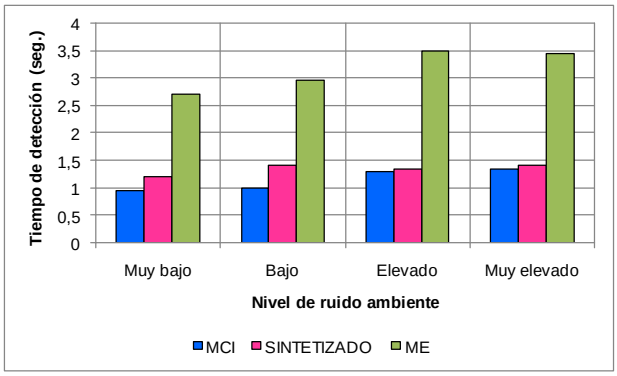

Figura 5. Tiempo de detección para vehículos con MCI y con ME (sin AVAS).

Este parámetro se evalúa con vehículos de ambas motorizaciones circulando a una velocidad constante en un entorno urbano. Obviamente la distancia a la que un vehículo es detectable acústicamente, depende fundamentalmente del nivel de ruido ambiental presente en los ensayos, ya que los niveles radiados por los vehículos, no dependen del nivel de ruido ambiental. Los trabajos más completos [2], distinguen entre niveles de ruido ambiente muy bajo, bajo, elevado y muy elevado, como se muestra en la figura 5, para tres tipologías de sonidos. Vehículos con MCI, vehículos con ME y vehículos donde se sintetiza un sonido similar al MCI pero 7 dBA más silencioso que el MCI más silencioso. Los resultados revelaron que los ambientes sonoros se pueden dividir en dos grupos. Los resultados con un nivel de ruido ambiente muy bajo y bajo muestran grandes similitudes y los resultados con un nivel de ruido ambiente alto y muy alto muestran también grandes similitudes. La comparación de los valores del tiempo de reacción con los niveles de presión sonora de detección, indican que no existe una correlación clara, entre el tiempo de reacción de los peatones y el nivel de presión sonora del sonido del vehículo, que es fundamental para su detección sonora (Figura 6).

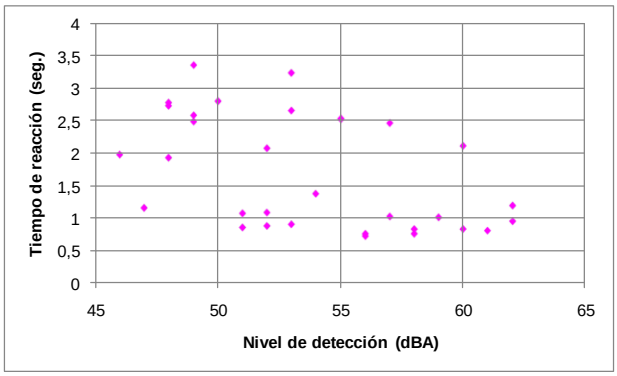

Figura 6. Tiempo de reacción al ruido de vehículos en función del nivel sonoro de detección.

El análisis espectral revela que para detectar la presencia de un vehículo en un ambiente ruidoso, es suficiente que el sonido emitido por el vehículo tenga bandas individuales de frecuencias bajas o altas, que sean prominentes. Los vehículos con MCI más modernos, especialmente los de gasolina, son extremadamente silenciosos en circulación a bajas velocidades, y por tanto el problema no se limita únicamente a los vehículos con ME. Se pueden obtener diferentes percepciones por parte de los peatones de los coches eléctricos y los vehículos con MCI, estando en los semáforos o en situaciones de estacionamiento, donde los vehículos están parados o se mueven a muy baja velocidad.

Para las personas invidentes, escuchar el sonido del motor al ralentí de un automóvil parado, es muy importante, para detectar la presencia de éste y evaluar el riesgo de la situación. Los vehículos con MCI modernos equipados con la función “start-stop”, son tan difíciles de percibir como los vehículos eléctricos, especialmente para las personas invidentes. En 2015, más del 80 % de los coches nuevos que circularon por la UE estaban equipados con la función “start-stop”. Por lo tanto, los vehículos con MCI tampoco pueden ser percibidos por el sonido que

generan mientras están parados. Este es otro punto en el que los vehículos eléctricos no tienen un potencial de riesgo mayor que los vehículos con MCI. Tampoco llevan AVAS los sistemas de transporte unipersonal, bicicletas y patinetes eléctricos. Sin embargo, este aspecto no se considera en la Directiva Europea que regula el uso del sistema AVAS, destinado exclusivamente a los vehículos con ME.

6. SISTEMA AVAS.

Todo empieza en 2003, cuando Deborah Kent Stein, una escritora ciega y activista de la Federación Nacional de Ciegos (NFB), conoce a través de un amigo el Toyota Prius, un vehículo híbrido que "es completamente silencioso cuando funciona con su batería, no es broma, no puedes oír nada" le dijo el amigo. Stein describió más tarde este fatídico encuentro con el automóvil eléctrico en un ensayo que publicó en la web de la NFB:

Me paré en la acera y escuché mientras nuestro amigo se subía al asiento del conductor y cerraba la puerta. Esperé a escuchar el sonido del motor del Prius cobrando vida y avanzando. Después de un par de minutos escuchando el canto de los gorriones, el rugido lejano de un soplador de hojas escuché la apertura de la puerta del coche. Entonces pregunto: Cuándo vas a empezar? Ya empecé respondió el amigo. Conduje hasta el final de la calle, luego retrocedí y volví a pasar frente a ti. En ese momento, sentí una fría sensación de temor. Tenemos un problema real, pensé. Popularizó la necesidad de que los coches hicieran ruido de coches [6].

Unos años más tarde, Lawrence D. Rosenblum, profesor de psicología en la Universidad de California, Riverside, leyó algo sobre el peligro de los vehículos silenciosos. Había realizado una investigación que mostraba que el cerebro presta especial atención a los sonidos que se mueven hacia el oyente, calculando automáticamente lo que Rosenblum llamó "tiempo hasta la llegada", que publicó en 2010 [13].

La National Federation of the Blind (NFB) (equivalente a la ONCE) gestó la idea del concepto de "mínimo ruido" que deberían hacer los vehículos eléctricos para ser detectables acústicamente. Esta entidad, que tiene mucho poder, exige a los fabricantes de vehículos, que tengan en cuenta los accidentes producidos y adopten una solución que los evite. Pocos años después en Enero de 2011, se apruebe el Pedestrian Safety Enhacement Act, que establece los medios para alertar a los peatones sin visión y otros peatones de la presencia del vehículo eléctrico. La solución propuesta fue que los vehículos eléctricos, emitieran un sonido que permitiera identificarlos acústicamente. Toyota, fue pionera en implementar un sistema de alerta llamado Approaching Vehicle Alerting Systems (AVAS) en 2009 en su modelo Prius. Finalmente para los vehículos "silenciosos" se adoptó la necesidad de disponer de un sistema de alerta llamado Audible Vehicle Alerting Systems (AVAS). El sistema AVAS genera un ruido artificial, en la parte delantera del vehículo, y la trasera en marcha atrás, para alertar de su presencia a las personas cercanas. Unos años más tarde, la UE adopta esta solución.

El sonido emitido por el sistema AVAS, tiene una componente tonal armónica que varía en función de la velocidad del vehículo, no del régimen de giro del motor. Con el vehículo parado, el sistema AVAS no emite sonido. Cuando el vehículo circula hasta los 20 Km/h en AVAS funciona. Para velocidades superiores se considera que el ruido de los neumáticos es suficiente para detectar la presencia del vehículo. Los niveles son variables en función del nivel sonoro ambiental, entre un mínimo de 56 dBA y un máximo de 75 dBA. A la vista del ciudadano que ha sufrido durante décadas el ruido de automoción, es probable que esta medida le parezca contradictoria con el concepto de vehículo eléctrico que es silencioso "per se".

Para los profesionales del sector, la decisión tampoco deja indiferente, ya que tras décadas de investigación, mediciones, y muchos recursos económicos invertidos para silenciar los vehículos, se llega a la conclusión de que el vehículo eléctrico es ahora "demasiado silencioso". Los nuevos sonidos de los vehículos eléctricos, van a necesitar de una fase de habituación que se prevé larga para aquellos que han escuchado durante muchas décadas cómo suena un vehículo de combustión interna.

Algunos trabajos de investigación apuntan que el sonido artificial procedente de los vehículos eléctricos, puede ser molesto, perjudicando la calidad del paisaje sonoro en

exteriores [7]. Como apuntan los estudios de Genuit y Fiebig, un sonido puede ser percibido como molesto si no es necesario. El aumento de señales artificiales de aviso, puede crear un entorno sonoro molesto [8]. Otros estudios apuntan que la influencia sobre el ruido ambiental, a menudo no se tiene en cuenta por completo en el desarrollo de señales de advertencia para vehículos eléctricos [9].

Con la reducción de la velocidad de circulación urbana, a un máximo de 30 Km/h, los sistemas AVAS estarán en funcionamiento durante largos períodos de tiempo, especialmente en el cruce de calles. El resultado va a ser una cacofonía de sonidos tonales que sin duda va a generar todo tipo de comentarios nada favorables entre la población. La sensación de desagrado generalizado que producen los sonidos artificiales del AVAS, se agudizarán con la reducción de vehículos con MCI que estén en circulación. Con niveles sonoros ambientales más moderados, se hace evidente que el sistema AVAS debería incorporar un sistema automático que active el sonido, en los momentos que sea necesario, en lugar de estar activo siempre cuando el vehículo se desplaza hasta velocidades de 20 Km/h.

En este sentido, la tecnología actual permite activar el sonido de un paso de peatones cercano, cuando se detecta en las cercanías a personas invidentes, y eso les permita guiarse y saber el estado del paso (luz verde o luz roja) mediantes sonidos “ad hoc”. Una vez se aleja la persona, el semáforo deja de sonar. Esto probablemente disminuiría la sensación de molestia o desagrado que estos sonidos van a producir entre la población [5]. La mejor solución para lograr una mayor seguridad, debería basarse en un sistema como el indicado anteriormente, en lugar de un sistema de sonido de advertencia indiscriminado como el sistema AVAS. De esta manera, se garantizará la seguridad de las personas invidentes, así como también de las personas mayores ante la presencia de los vehículos con ME, sin necesidad de añadir más de ruido, mediante un sistema de alerta individual. Los resultados de diferentes estudios, muestran que en la transición a la movilidad eléctrica, quizás no sea necesario regular por ley, las advertencias sonoras para los vehículos eléctricos a velocidades bajas.

La bicicleta, el patinete eléctrico, monociclo y otros medios de locomoción urbanos, pueden alcanzar velocidades superiores a los 25 Km/h. El aumento notables de estos vehículos en la circulación urbana, unido al poco o nulo respeto por las normas de circulación, están causando un número creciente de accidentes, en la colisión con peatones. Algunos accidentes han tenido un resultado fatal, con la muerte del peatón. Todos estos vehículos pasan muy cerca de los peatones, incluso por el mismo camino y sin embargo no se les exige llevar ningún sistema AVAS, que alerte de su presencia. Tampoco están matriculados, ni precisan de carnet para conducirlos, ni pagan impuestos, ni tienen seguro obligatorio, ni control de ITV.

7. BRANDING SONORO.

La generación de sonido añadido de los vehículos con ME, abre la posibilidad a que las distintas marcas de vehículos utilicen el sonido para diferenciarse de la competencia. Esto ya se hace con el sonido de algunas partes del vehículo, como el sonido de escape exterior, el sonido de cierre de las puertas, etc. Es lo que se conoce como “branding” sonoro. Básicamente el branding trata de destacar las virtudes del producto o servicio, para acercarlos a las necesidades del consumidor, de tal manera que éste asocie su necesidad con el producto o servicio en cuestión.

Del mismo modo que reconocemos un logotipo, un color o un tipo de letra, es posible identificar unas marcas concretas a través de su “huella auditiva” [10]. El sonido constituye un camino expresivo de gran poder para transmitir mensajes. El poder de sugestión del lenguaje sonoro, permite alimentar la imaginación y con ello potenciar una marca. El branding auditivo respalda y redefine la comunicación de marca, diseña un entorno sonoro concreto, y se erige como un factor esencial en la experiencia del cliente.

El sonido puede transmitir información al cerebro y este procesarla, mucho más rápido que otros sentidos. Por ejemplo se ha establecido que la respuesta del sentido auditivo a los estímulos sonoros es cien veces más rápida que la respuesta a las imágenes. Esta particularidad hace que el sonido sea especialmente atractivo para reforzar el mensaje visual de una marca, por ejemplo. Además, el sentido auditivo nunca deja de recibir estímulos auditivos y está en permanente funcionamiento. Es curioso que una persona dormida, pueda

recordar el ruido que la ha despertado. Los neurólogos han descubierto que el ruido que entra por nuestros oídos en realidad permanecerá en nuestra mente durante casi cinco segundos antes de que comience a desvanecerse, mientras que las imágenes que llegan a través de los ojos desaparecen en menos de un segundo.

No procesamos el sonido de manera racional porque no llega a la parte racional de nuestro cerebro, y afecta nuestras emociones. Se ha estudiado y probado que la música provoca más respuestas emocionales que visuales. De hecho, la música, al igual que el lenguaje, tiene estructura, progresión y sintaxis. El cerebro humano procesa la sintaxis de la música en la misma área que procesa la sintaxis del lenguaje. Debido a la sobrecarga de información y sensorial diaria a que estamos sometidos, muchos estímulos visuales no llegan al cliente. Sin embargo, el oído no se puede desconectar o apagar, procesa señales acústicas permanentemente. Las señales acústicas no necesitan ser tratadas conscientemente por el consumidor, funcionan como una “señal periférica” e inducen un mecanismo de actitud por debajo del nivel de procesamiento cognitivo [11]. Además, los mensajes de sonido no necesitan ciertos códigos de idiomas o terminología para ser recordados [12].

Las grandes marcas del sector automovilístico, han invertido mucho tiempo y recursos, para desarrollar su propio sonido, pensado en los vehículos eléctricos. En todos los casos, los fabricantes buscan un sonido que los identifique y a la vez los distinga de la competencia. El reto para diseñar estos sonidos que identifican a una marca de vehículos es complejo. Los sonidos deben ser reconocibles pero no destacar en exceso puesto que se podría considerar como intrusivo. Un punto común en todas las propuestas, es que el sonido ha de ser proporcional a la velocidad, y debe ser audible solo para las bajas velocidades.

8. LIMITACIONES EN LA REDUCCIÓN DEL NIVEL SONORO.

El motor eléctrico es más ligero que el de combustión interna. Además no requiere de pesados sistemas como el cambio de marchas, embrague, escape etc. Que añaden más peso al conjunto. Por tanto se espera que un vehículo eléctrico tenga un menor peso y además mayor volumen disponible. Sin embargo el vehículo eléctrico precisa de energía para moverse, y los vehículos actuales almacenan esta energía en baterías. Estas baterías deben almacenar energías de varias decenas de KW, para ofrecer una autonomía digna, y eso se traduce en un peso extra notable. La tabla 3, resume las características mecánicas para vehículos utilitarios, con MCI y con ME. Se puede observar que el peso del vehículo se ha incrementado notablemente, también la potencia, y para poder controlar al vehículo, tanto en tracción como en frenada, los neumáticos mantienen su sección y por tanto el ruido emitido por éstos. El incremento medio de peso se sitúa en un 46%, mientras que el incremento medio de potencia es del 27%.

VEHICULO	MOTOR	PESO (Kg)	POTENCIA (KW)	NEUMATICO
1	Electrico	1.988	80	185/65R15
2	Electrico	1.711	96	195/60R18
3	Electrico	1.565	81	205/60R16
4	Electrico	1.530	100	195/55R16
5	Electrico	1.530	100	195/55R16
VEHICULO	**MOTOR**	**PESO (Kg)**	**POTENCIA (KW)**	**NEUMATICO**
1	Gasolina	1.148	81	185/65R15
2	Gasolina	1.145	70	185/65R15
3	Gasolina	1.165	74	195/55R16
4	Gasolina	1.177	75	195/55R16
5	Gasolina	1.055	61	185/65R15

Tabla 3. Comparativa entre vehículos utilitarios eléctricos y con MCI en peso, potencia y sección de neumático.

La tabla 4, muestra la misma tendencia para los vehículos de alta gama. Se observa que el incremento medio de peso se sitúa en un 39%, mientras que el incremento medio de potencia es del 27%.

VEHICULO	MOTOR	PESO (Kg)	POTENCIA (KW)	NEUMATICO
1	Electrico	2.100	235	245/35R21
2	Electrico	1.922	225	235/40R19
3	Electrico	2.490	265	255/55R19
4	Electrico	2.300	150	235/55R19
5	Electrico	2.425	300	235/50R20
VEHICULO	**MOTOR**	**PESO (Kg)**	**POTENCIA (KW)**	**NEUMATICO**
1	Gasolina	1.655	180	245/45R19
2	Diesel	1.740	180	245/45R19
3	Diesel	1.615	140	245/45R18
4	Gasolina	1.660	245	245/40R18
5	Gasolina	1.429	180	225/35R19
6	Gasolina	1.250	103	235/45R19

Tabla 4. Comparativa entre vehículos eléctricos y con MCI de gama alta, en peso, potencia y sección de neumático.

El excesivo peso de las baterías condiciona el comportamiento mecánico de los vehículos eléctricos. Al tener más peso, hay una inercia mayor, lo que se traduce en una mayor dificultad para acelerar y para frenar el vehículo. El elevado par motor puede compensar el aumento de peso y permite tener buenas aceleraciones, pero detener el vehículo requiere de sistemas de frenado potentes.

A nivel acústico, en un vehículo eléctrico el elemento más ruidoso, es el neumático. Como este mantiene actualmente las secciones de los neumáticos, el nivel de ruido lamentablemente va a permanecer. La solución para conseguir que realmente el vehículo eléctrico sea silencioso, es que utilice neumáticos más estrechos. La gran mayoría de vehículos, sean eléctricos o con MCI, ofrecen prestaciones mecánicas que permiten circular a velocidades muy superiores a las máximas permitidas. Parece un contrasentido tener vehículos pesados y muy potentes para ir a 120 Km/h en la autopista.

Por otro lado el excesivo peso de los vehículos eléctricos, es un punto hoy en día insalvable, salvo que en lugar de baterías, se usen otros elementos que permitan obtener energía (preferiblemente limpia) sin necesidad de almacenarla. Si la potencia del propulsor de ajusta a las necesidades racionales de circulación, la sección del neumático actual de 235 podría quedar en 125 y el ruido de los neumáticos se podría reducir a unos 5 dBA, como se muestra en la figura 7.

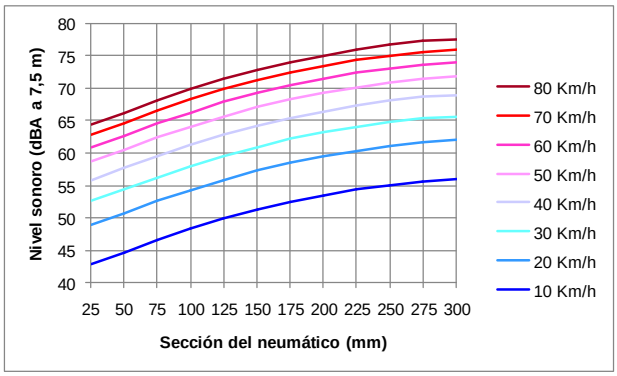

Figura 7. Nivel de ruido de neumático en función de la anchura de éste y de la velocidad.

Las grandes firmas de automóviles han contratado a músicos y compositores para ayudar en la creación de sistemas de alerta agradables. Hans Zimmer, el compositor de películas, participó en la composición de los sonidos para el automóvil Vision M Next de BMW. El sonido del Volkswagen ID.3 fue creado por Leslie Mándoki, un productor alemán-húngaro de rock progresivo/jazz adyacente. El músico electrónico residente en Atlanta, Richard Devine, fue contratado para ayudar a crear el ronroneo del Jaguar I-Pace. Algunos fabricantes de automóviles crearon sonidos completamente internos. El Porsche Taycan Turbo S tiene una de

las alertas más audaces. Los ingenieros del Audi Sound Lab crearon las frecuencias más bajas de la alerta del Audi E-Tron GT Quattro mezclando algorítmicamente diferentes tonos producidos al grabar un ventilador eléctrico a través de un largo tubo de metal. Otras alertas se inclinan más hacia la naturaleza. Danni Venne, el diseñador jefe del sonido del Nissan Leaf, dijo en una entrevista que “realmente tienes que buscar instrumentos que no tengan un ataque fuerte. Instrumentos de viento, flautas, oboes, clarinetes. . . puede vacilar un poco”. Tesla lanzó en diciembre de 2020 el boombox, como parte de una actualización de software. Esta aplicación permite a los conductores de Tesla, según Elon Musk, "deleitar a los peatones con una variedad de sonidos del altavoz externo de su vehículo", incluidos balidos de cabra, música de camiones, aplausos y flatulencias. A principios de 2022, la NHTSA dictaminó que boombox no cumple las reglas de seguridad al emitir sonidos en marcha. Actualmente boombox sólo puede usarse cuando el vehículo está parado.

8. PAISAJE SONORO URBANO.

Los sonidos prevalentes en entornos urbanos en un futuro no muy lejano, van a estar dominados por una cacofonía de sonidos con componentes tonales, en el rango de las frecuencias medias. Los sonidos actuales dominados por el régimen de giro del motor, unido a los saltos en frecuencia propiciados por el cambio de marchas, están muy interiorizados en la cultura y experiencia personal de la gran mayoría de la población. Será necesario un período de adaptación a los nuevos sonidos, que conllevará un tiempo. Los nuevos sonidos son más sintéticos y carentes de “naturalidad”, y esto hace que no “encajen” en el paisaje sonoro urbano actual. El sistema AVAS como se conoce hoy, desaparecerá ante los sonidos “branded content” de los grandes fabricantes de vehículos y la excesiva sonoridad “artificial” de los nuevos paisajes sonoros. En cierta manera se volverá al inicio de la automoción, donde la máquina produce un sonido que identifica acústicamente, cómo funciona y opera.

Para las personas que intentan dormir en una ciudad que nunca lo hace, escuchar los sonidos que nos rodean es la función natural inalterable, del sentido auditivo. El cerebro debe ignorar una gran cantidad de ruido metropolitano que considera “normal”, mientras permanece alerta a los sonidos inusuales que pueden ser de vital importancia. El cerebro despierto realiza una función de filtrado similar en el paisaje sonoro urbano, ignorando tantos ruidos sin sentido como sea posible. Los investigadores explican este fenómeno en términos de novedad y adaptación. Los sonidos familiares y con patrones regulares, como los MCI, los equipos de aire acondicionado, no nos despiertan, porque no despiertan la curiosidad acústica. Una perturbación sonora nueva o irregular se destaca, en medio del desorden sonoro. Pero una alerta novedosa o útil, puede convertirse con el paso del tiempo en un ruido repetitivo sin sentido. Lejos de mezclarse en una especie de ecosistema acústico, los ruidos de la ciudad tienden a competir entre sí para ser escuchados, una competencia auditiva en la que finalmente gana el sonido más fuerte.

La electrificación del transporte ofrece la oportunidad de disponer de medios de transporte eficiente y silencioso, que realmente tienen una gran acogida entre una parte de la población, como el caso del patinete eléctrico. Los motores de los automóviles, por muy molestos que les parezcan a los ciudadanos que no conducen, proporcionan información que nos protege de las colisiones mientras transitando por las calles. El ruido del motor no solo anuncia la presencia de un vehículo, también indica su dirección, su velocidad y si está acelerando o desacelerando. Las mismas perturbaciones que el cerebro ignora mientras se duerme, son de gran ayuda cuando se va en bicicleta o patinete en medio del tráfico y no puedo apartar la vista de la carretera para mirar hacia atrás. Y para los peatones absortos en el texting con sus teléfonos, los sonidos del motor son salvavidas cotidianos.

Andrea Cera, un productor musical y compositor italiano, ve la electrificación de la movilidad como una oportunidad para repensar fundamentalmente la acústica caótica de una ciudad. Visualiza un paisaje sonoro urbano inspirado en el canto de los pájaros en la naturaleza donde, en lugar de competir para ser escuchados, diferentes sonidos encajan en un ecosistema acústico general. Al analizar los paisajes sonoros de todo el mundo, Cera ha identificado “estos pequeños nichos donde se podría poner un poco de sonido, para estar presente sin ser ruidoso. Solo un tono, no una melodía”. Acaba sentenciando, “Si el paisaje sonoro es muy caótico (automóviles, teléfonos, bocinas), la mejor manera de hacerse notar es quedarse quieto”.

9. CONCLUSIONES.

El vehículo eléctrico será sin duda el medio de transporte futuro. Lo que va a cambiar será el concepto de almacenar la energía, que salvo nuevas tecnologías por descubrir, es una tarea muy difícil para asegurar autonomías y sobre todo tiempo de recarga de energía comparables a los actuales. Se impondrá el concepto de generar energía cuando sea necesaria, en lugar de almacenarla. Por otro lado actualmente el concepto de la "propiedad de los vehículos" se va disipando con las nuevas generaciones, y se va a sustituir masivamente por el car-sharing. Ante esta situación, a quien le importa como suene un vehículo si no es suyo? Por tanto los sonidos de las marcas, el AVAS y otras cuestiones relacionadas irán perdiendo importancia. El sonido del transporte con vehículos, tenderá a ser mayoritariamente como el de los aviones, los trenes o los barcos, todos "sonaran igual", y donde los distintos fabricantes deben cumplir unos niveles máximos de emisión, pero nadie se va a preocupar por un sonido "branded content". Sólo los que puedan adquirir un vehículo podrán tener esta cualidad.

Mientras llegan los grandes cambios, en el futuro inmediato, la reducción sonora del transporte eléctrico, que podría situarse en unos 8-9 dBA, acabará siendo inferior a los 3 dBA, aunque la sensación para los ciudadanos será mayor, gracias a la desaparición de las bajas frecuencias, justamente esas que permiten saber cómo está circulando un vehículo concreto. El vehículo eléctrico no será realmente ventajoso, hasta que no se encuentre un sistema que facilite energía en el momento que se necesita, en lugar de almacenar grandes cantidades de energía. Acústicamente, sería deseable que los sistemas AVAS que radian sonido siempre que la velocidad esté entre 0 y 20 Km/h, aunque no hayan personas cercanas, utilice tecnología actual que permitiría emitir sonido cuando sea necesario, siendo un sistema más inteligente. En todo caso, por desgracia siempre habrá alguna "mente pensante" con capacidad de decisión, que no permitirá que el paisaje sonoro en las ciudades del futuro sea agradable y silencioso.

REFERENCIAS.

[1] Dudenhöffer M.A.K.; Hause, L. *Sound Perception of Electric Vehicles*. Research Acoustics (2011)

[2] Altinsoy E. *The detectability of conventional, hybrid and electric vehicle sounds by sighted, visually impaired and blind pedestrians*. Dresden. Internoise 2013 (2013)

[3] OLEV. *Driving the Future Today. A strategy for ultra low emission vehicles in the UK.* London. Crown. (2013)

[4] Sandberg, U. *Adding noise to quiet electric and hibrid vehicles: an electric issue.* Acoustics Australia. (2012)

[5] Barti, R. *El Vehículo Eléctrico y la Reducción del Ruido Ambiente en Ciudades*. Comunicaciones EuroRegio 2016. (2016)

[6] (N) Frye, D.B. *We Want Cars that Sound like Cars.* Braille Monitor. NFB (2007)

[7] Giudice, S., Jennings, P., Cain, R., Humphreys, L., & Song, W. *Perceptial Dimentions for Electric Vehicle Sound Quality.* Proceedings of Internoise 39. (2010)

[8] Genuit, K., Fiebig, A. *Die Relevanz der Psychoakustik für die E-mobility*. Proceedings DAGA 38. (2012)

[9] Genuit, K., Fiebig, A. *Alternative alert signal concepts and their perceptual implications.* Proceedins of Internoise 45. (2016)

[10] Simmons, R. *Music branding - what is the real score*. Blog post. (2005)

[11] Petty, R., Cacioppo, J., Schumann, D. *Central and Peripheral Routes to Advertising Effectiveness: The moderating Role of Involvement*. Central and Peripheral Routes to Advertising Effectiveness: The Moderating Role of Involvement. (1983)

[12] Park, W., Young, M. *Consumer response to Television Commercials: The Impact of Involvement and Background Music on Brand Attitude Formation.* Journal of Marketing Research. (1986)

[13] Rosenblum, L.D. *See What I'm Saying.* (2011)