

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



"ANÁLISIS DE LA REPERCUSIÓN SONORA DE LOS  
VEHÍCULOS URBANOS ELECTRIFICADOS PARA  
TRANSPORTE PÚBLICO EN LA CIUDAD DE ELCHE."

TRABAJO FIN DE GRADO

Septiembre-2023

AUTOR: Cristian Ángel Pérez Muñoz.

DIRECTORES: Héctor Campello Vicente.

Miguel Fabra Rodríguez.

**ÍNDICE**

1. INTRODUCCIÓN .....	7
2. VIABILIDAD VEHÍCULO ELÉCTRICO .....	9
3. MODELOS DE PREDICCIÓN DE RUIDO .....	11
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	11
3.2. C.O.R.T.N .....	13
3.3. FHWA .....	14
3.4. RLS 90 .....	14
3.5. NORD 2000.....	15
3.6. NMPB ROUTES 08.....	16
3.7. CNOSSOS-UE .....	17
4. OBJETIVOS.....	23
5.    FASE COMPUTACIONAL EN MATLAB.....	24
5.1. ESTUDIO DE POTENCIA SONORA EN EL TRÁFICO RODADO .....	24
5.1.1. POTENCIA SONORA DE RODADURA.....	24
5.1.2. POTENCIA SONORA DEL MOTOR.....	27
5.2. ESTUDIO DE LA PROPAGACIÓN SONORA.....	29
5.2.1. CONDICIONES METEOROLÓGICAS.....	31
5.2.2. DIVERGENCIA GEOMÉTRICA .....	31
5.2.3. ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA .....	32
5.2.4. ABSORCIÓN DEL TERRENO .....	32
5.2.5. ATENUACIÓN POR APANTALLAMIENTOS.....	33

5.2.6.TÉRMINO DEBIDO A LA PONDERACIÓN A.....	33
5.2.7.CORRECCIÓN METEOROLÓGICA PARA PERIODOS PROLONGADOS.....	33
5.3. FUENTE LINEAL .....	34
6. TRABAJO DE CAMPO .....	37
7. FASE COMPUTACIONAL IMMI .....	40
8. RESULTADOS .....	45
8.1. RESULTADOS GPS .....	45
8.2. RESULTADOS MATLAB .....	45
8.3. RESULTADOS SONÓMETRO .....	46
8.4. RESULTADOS IMMI.....	47
9. ANÁLISIS.....	52
9.1. ANÁLISIS MATLAB.....	52
9.2. ANÁLISIS IMMI .....	57
10. CONCLUSIONES.....	63
11. ANEJOS .....	64
11.1. ANEJO 1 .....	64
11.2. ANEJO 2 .....	71
12. BIBLIOGRAFÍA.....	73

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1: Clasificación de vehículos [4].	20
Tabla 2: Valores de coeficientes del factor suelo [4].	33
Tabla 3: Resultados eléctricos MATLAB.	46
Tabla 4: Resultados térmicos sonómetro.	46
Tabla 5: Resultados eléctricos sonómetro.	46
Tabla 6: Comparación resultados eléctricos sonómetro-MATLAB.	47
Tabla 7: Caudales térmicos y eléctricos iniciales.	48
Tabla 8: Resultados presiones sonoras iniciales en IMMI.	49
Tabla 9: Comparación presiones sonoras iniciales IMMI-MATLAB.	49
Tabla 10: Diferencia presiones sonoras iniciales IMMI-MATLAB.	50
Tabla 11: Comparación presiones sonoras finales IMMI-MATLAB.	51
Tabla 12: Diferencia presiones sonoras IMMI-MATLAB tras las iteraciones.	51
Tabla 13: Habitantes afectados autobús térmico.	60
Tabla 14: Habitantes afectados autobús eléctrico.	61
Tabla 15: Suma habitantes niveles autobús térmico.	61
Tabla 16: Suma habitantes niveles autobús eléctrico.	61
Tabla 17: Coeficientes $A_{R,i,m}$ , $B_{R,i,m}$ , $A_{P,i,m}$ , $B_{P,i,m}$ según categorías [4].	64
Tabla 18: Coeficientes $\alpha$ en bandas de octava para los diferentes tipos de calzadas. [4]	66
Tabla 19: Coeficientes $\beta$ para los diferentes tipos de calzadas. [4]	68

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 20: Tipos de calzadas.....	70
Tabla 21: Coeficientes $\alpha_{atm}$ en bandas de octava. [4].....	70



**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1: Ubicación de la fuente puntual equivalente en vehículos ligeros, pesados y de dos ruedas [4]. ..... 21

Figura 2: Sonómetro Integrador tipo 1..... 37

Figura 3: Toma de datos en zona Candalix con sonómetro Integrador tipo 1.. 38

Figura 4: Toma de datos en zona MAHE con sonómetro Integrador tipo 1..... 38

Figura 5: Toma de datos en zona Diagonal del Palau con sonómetro Integrador tipo 1. .... 39

Figura 6: Cartografía ciudad de Elche en AutoCAD con ruta del autobús..... 41

Figura 7: Resultados decibelios IMMI autobús térmico. .... 43

Figura 8: Leyenda cromática resultados IMMI..... 44

Figura 9: Configuración IMMI. .... 48

Figura 10: Ruta vehículo-velocidad. .... 53

Figura 11: Mapa potencias sonoras vehículo térmico. .... 54

Figura 12: Mapa potencias sonoras vehículo eléctrico..... 55

Figura 13: Mapa presiones sonoras vehículo térmico. .... 56

Figura 14: Mapa presiones sonoras vehículo eléctrico. .... 56

Figura 15: Gráfica habitantes afectados por autobús térmico. .... 57

Figura 16: Gráfica habitantes afectados por autobús eléctrico..... 58

Figura 17: Gráfica comparativa habitantes afectados autobús térmico/eléctrico. .... 59

## 1. INTRODUCCIÓN

El ruido está presente en cualquier actividad que se realice en el día a día, desde el ruido que emana de una herramienta hasta el ruido que realizamos al pasear por las aceras. El problema se encuentra cuando los niveles de ruido superan unos límites establecidos y se convierten en perjudiciales para las personas que están expuestas. Esta situación puede incluso llegar a provocar graves problemas de salud en las personas que lo sufren debido a alteraciones de sueño, estrés, etc., entre otras causas.

El nivel de contaminación acústica en las zonas urbanas se encuentra en aumento en los últimos años debido al crecimiento de manera paralela del volumen de tráfico rodado.

Con el paso de los años, los niveles de contaminación acústica han ido tomando relevancia. Esta situación se muestra en las crecientes políticas reguladoras que van tomando trascendencia con la finalidad de reducir al máximo el nivel de ruido y la situación que eso conlleva.

A nivel europeo, se adoptaron las medidas que se recogen en la Directiva 2002/49/CE [1]. En este documento se recogen una serie de criterios de evaluación y medidas que se deben llevar a cabo para poder acotar la problemática de la contaminación acústica. A su vez, este documento recaba una serie de condiciones que se deben cumplir:

- La elaboración de mapas de ruido mediante los criterios y medidas de evaluación de los Estados Miembros que forman parte de la Unión Europea.
- Una vez se han elaborado y recogido estos datos, es necesario informar a la población sobre los resultados obtenidos y las consecuencias que pueden derivarse.
- En base a los resultados obtenidos, elaborar planes de mejora para conseguir la reducción del nivel del ruido ambiental, evitando, como se ha comentado anteriormente, posibles efectos nocivos para la salud de los habitantes [1].

En los inicios de esta Directiva, los mapas acústicos se debían realizar en aquellas localizaciones con una población superior a 250.000 habitantes, bajando esta cifra hasta un total de 100.000 habitantes desde el año 2014 en adelante.

Para la confección de los comentados mapas de ruido es necesario emplear técnicas y herramientas adecuadas que recreen situaciones lo más cercanas a la realidad, en función de las fuentes de ruido existentes en la zona bajo estudio. La elaboración de un mapa puede llevarse a cabo o bien a partir de mediciones acústicas en la zona estudiada, o mediante simulaciones computacionales, siendo la metodología más empleada un método mixto que combine la utilización de mediciones experimentales para validar y calibrar las predicciones realizadas de forma computacional [3].

Existen diferentes modelos para la predicción de ruido. Los Estados Miembros de la Unión Europea están obligados a utilizar el modelo de predicción de ruido conocido como CNOSSOS (Common Noise Assessment Methods in Europe) [4]. En este modelo se encuentran recogidas las principales fuentes de emisión de ruido, así como la manera en la que se propaga el ruido emitido por dichas fuentes.

Con todo lo comentado anteriormente, el presente documento se centrará en el estudio y desarrollo del modelo de predicción de ruido del tráfico rodado CNOSSOS aplicado a los autobuses eléctricos, así como de las consecuencias de la sustitución de la flota de autobuses urbanos térmicos por autobuses urbanos eléctricos en la ciudad de Elche.

## 2. VIABILIDAD VEHÍCULO ELÉCTRICO

En la actualidad, se puede observar cómo toma cada vez más importancia y relevancia todo lo relacionado con lo eléctrico. De la misma manera sucede en el campo de los vehículos. Se puede observar como en los últimos años aparecen nuevos vehículos con tecnología híbrida o eléctrica, dejando de lado el convencional vehículo de propulsión mediante combustión interna.

Los autobuses de las ciudades no podían estar en otra sintonía. Existen autobuses que en lugar de utilizar propulsión a base de combustibles fósiles, emitiendo así gases de efecto invernadero a la atmósfera, utilice tecnología eléctrica para conseguir el movimiento del vehículo, a la vez que se consigue una mejora a diferentes niveles, como la disminución de contaminantes o la reducción de ruido.

Siguiendo en esta línea, la ciudad de Elche ha adoptado una serie de acciones para conseguir los objetivos de la Estrategia ELX2030, la cual contempla una serie de actuaciones de gobernanza local para favorecer el desarrollo sostenible, el bienestar social, el crecimiento económico, la prosperidad urbana y la calidad de vida en el municipio [5].

Para cumplir con la Estrategia ELX2030, en mayo del año pasado el Pleno de Elche aprobó el Plan de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS). Dentro de este Plan se recogen una serie de medidas de mejora, como pueden ser la peatonalización de diferentes zonas y barrios de la ciudad de Elche, carriles bici para fomentar y asegurar una correcta circulación de bicicletas por diferentes espacios. Además, otro objetivo importante que se persigue cumplir, es la reducción de emisiones contaminantes en un 50% para la década siguiente. Esto último se consigue gracias a un aumento del transporte público, haciendo que se reduzca en un 9,1% los desplazamientos mediante vehículos de uso privado [6].

Los ciudadanos de Elche también han podido observar como en las calles ilicitanas circulan autobuses híbridos e incluso ya se encuentran en circulación autobuses puramente eléctricos. Con estas novedades, no sólo se consigue una reducción de emisiones y gases de efecto invernadero, sino que además

se consigue una disminución del nivel de ruido, ayudando también a eliminar la problemática de la contaminación acústica.



### 3. MODELOS DE PREDICCIÓN DE RUIDO

#### 3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Independientemente del modelo de predicción empleado de la actualidad, de forma general los modelos de predicción de ruido nacen de la necesidad de disponer de una herramienta que permita prever o evaluar los niveles sonoros que existentes en una zona. La comparación entre las previsiones y los máximos niveles sonoros permitidos en la normativa dota a las autoridades de información de la situación acústica de un lugar para llevar a cabo las medidas correctoras necesarias tratando de evitar impactos no deseados, o la realización de medidas correctoras posteriores más costosas en el caso de la predicción sobre nuevos planteamientos urbanísticos.

La elaboración de un modelo debe contemplar, esencialmente, dos aspectos: el modelo de fuente y el modelo de propagación [7]. Aun así, en el presente proyecto tomará relevancia el estudio del modelo fuente, que se encarga de asignar una potencia acústica a las fuentes en función de diferentes variables, debido a que el estudio se centra, en gran parte, en la emisión de ruido de vehículos urbanos eléctricos. Dentro de este apartado, consideramos la potencia sonora debido al motor y a la rodadura.

Durante el paso de los años, han sido diferentes los modelos de predicción que se han ido desarrollando, siendo Gilbert [8] en 1977 unos de los pioneros en presentar una serie de expresiones, mediante medidas que fueron llevadas a cabo en la ciudad de Edimburgo, para poder determinar el nivel de ruido usando para ello el percentil 10.

Poco tiempo después, en el año 1983, Favre [9] comparó los diferentes modelos que existían para predecir el nivel de ruido, teniendo en cuenta si cada uno de los modelos analizados utilizaba métodos manuales o métodos computacionales. Dentro de los distintos modelos que se analizaron, Favre destaca el método de predicción “Nord 2000” [10] en el que los cálculos se realizaban mediante ábacos y cálculos. Lo mismo sucede con otro método que Favre también destaca. Este modelo se conoce como FHWA [11] y los resultados también los obtiene mediante ábacos y cálculos.

Otro tipo de modelos que podemos encontrar son los modelos físicos a escala que se utilizan como última opción y donde es complicado utilizar los modelos matemáticos o manuales.

Si se fija la atención en la separación de modelos de predicción realizada por Favre, se encuentran gran cantidad de investigadores que desarrollan expresiones de predicción de ruido a lo largo de los años, por ejemplo en 1987 Jraiw [12] y Radwan y Oldman [13] desarrollaron por separado sus modelos computacionales generando una mayor información que los primeros modelos comentados, ya que no solo obtenían el Leq sino que aportaba de forma adicional con los niveles L10, L50 y L90 (Jraiw) aplicando la teoría de trazado de rayos (Radwan y Oldman), generándose y validándose ambos a partir de mediciones de campo en zonas urbanas.

Buscando trabajos que se diferencien de los expuestos anteriormente, se encuentran los desarrollados por los investigadores Cammarata, Cavalieri y Fichera [14] en 1995, quienes aplicaron redes neuronales a los modelos de predicción de ruido usando la red de retropropagación BPN, necesitando mediciones acústicas en determinados casos tan libres de error como fuese posible debido a la complejidad del método.

Más tarde, en el año 1999, Federico Miyara [15] desarrolló una serie de parámetros para corregir los modelos de predicción. Estas correcciones incluyen conceptos como la propagación del sonido en exteriores, reflexión, efectos del viento..., entre otros.

Por lo tanto, como se puede observar, a lo largo del tiempo han ido apareciendo diferentes modelos de predicción de ruido, siendo cada uno ellos diferentes y obteniendo unos resultados u otros dependiendo del tipo de cálculo empleado en el modelo de predicción, así como las correcciones que estuvieran incluidas o no dentro de cada uno de los modelos.

Entre los diferentes modelos, también se encuentran diferencias a la hora de considerar la fuente de ruido y de la consideración de cómo se genera el ruido.

Por otro lado, encontramos los modelos en los que la emisión acústica se toma como referencia un vehículo en la vía mediante el cual tiene lugar la emisión de

ruido del conjunto del tráfico, haciendo valer para ello el análisis teórico. El modelo FHWA se encuentra dentro de este tipo de modelo [11].

A su vez, se pueden encontrar modelos en los que en lugar de considerar una fuente puntual utilizan una fuente lineal, desde donde se desprende la potencia acústica. En ellos se asigna una potencia acústica por unidad de longitud de vía. También se puede considerar que a una distancia determinada tenemos un nivel base, todo esto teniendo en cuenta diferentes variables que puedan afectar a los resultados obtenidos como pueden ser la velocidad de los vehículos, la cantidad de ellos que estén circulando, el tipo de vía, etc. Como ejemplos de estos modelos, se pueden citar el modelo STL-86 [16], de origen alemán; el modelo RLS-90 [17], de origen sueco; el modelo inglés C.O.R.T.N [18]; el modelo francés NMPB [19] [20] o el modelo CNOSSOS [4], de obligado cumplimiento en los distintos países que conforman parte de la Unión Europea.

A continuación, se explican de manera abreviada los modelos fuente de algunos de los métodos de predicción de ruido, indicando también las expresiones que justifican sus cálculos:

### 3.2. C.O.R.T.N

Este modelo de predicción se desarrolla por primera vez en Inglaterra en el año 1975, llamado C.O.R.T.N (Calculation of Road Traffic Noise) [18]. Este modelo realiza una predicción del nivel estadístico  $L_{10}$ , con el flujo de tráfico correspondiente a un periodo de tiempo de 1 hora o de 18 horas

Este modelo considera una distancia de referencia a la fuente sonora de 10 metros y una altura de referencia sobre la calzada de 0,5 metros.

$$L_{10 (1h)} = 42,2 + 10 \cdot \log_{10} Q_{1h} \quad (1)$$

$$L_{10 (18h)} = 29,1 + 10 \cdot \log_{10} Q_{18h} \quad (2)$$

Dónde:

- $Q_{1h}$  es el caudal de vehículos para 1 hora.
- $Q_{18h}$  es el caudal de vehículos para 18 horas.

A las expresiones (1) y (2) hay que aplicarles un factor de corrección que depende de la velocidad y de cómo está compuesto el flujo de tráfico:

$$C_{v,p} = 33 \cdot \log_{10} \left( v + 40 + \frac{500}{v} \right) + 10 \cdot \log_{10} \left( 1 + 5 \cdot \frac{p}{v} \right) - 68,8 \quad (3)$$

Dónde:

- $v$  es a velocidad del flujo de tráfico medida en km/h.
- $p$  es la proporción de vehículos pesados.

### 3.3. FHWA

Este modelo, no es de origen europeo. Su origen se encuentra en los Estados Unidos de América, donde en 1978 se desarrolló el FHWA [11]. En este modelo, el nivel final de ruido se obtiene al sumar los niveles que se obtienen de manera independiente para cada clase de vehículo.

Este modelo considera una distancia de referencia de 15,2 metros y una altura de referencia de 1 metro. El modelo FHWA considera un flujo de vehículos compuesto por vehículos ligeros, camiones medianos y camiones pesados. Siendo camiones medianos aquellos que tiene dos ejes y los camiones pesados los que tienen 3 ejes.

$$L_{Eq}(A) = 10 \cdot \log_{10} \left( 10^{(0,1 \cdot L_{Eq}(d) \text{Ligero})} + 10^{(0,1 \cdot L_{Eq}(d) \text{Mediano})} + 10^{(0,1 \cdot L_{Eq}(d) \text{Pesado})} \right) \quad (4)$$

### 3.4. RLS 90

El Departamento de Construcción de Carreteras del Ministerio Federal de Transportes Alemán publicó un documento llamado “Directivas para la Protección de Ruido en las Carreteras”. Dicho documento proporciona un modelo de predicción de ruido, conocido como RLS 90 [17].

Este modelo considera una distancia de referencia a la fuente sonora de 25 metros y una altura de referencia sobre la calzada de 4 metros. Al igual que en el modelo francés, el RLS 90 considera un flujo de vehículos compuesto por vehículos ligeros y vehículos pesados.

$$L_{ME} = L_{25} + C_v + C_p \quad (5)$$

$$L_{25} = 37,3 + 10 \cdot \log [Q_l \cdot (1 + 0,082 \cdot Q_p)] \quad (6)$$

Dónde:

- $L_{25}$  es el nivel sonoro a la distancia de referencia a la fuente sonora de 25 metros.
- $C_v$  es una corrección de la velocidad en función del tipo de vehículo.
- $C_p$  es una corrección debida a la superficie de la carretera.
- $Q_l$  es el flujo de vehículos ligeros.
- $Q_p$  es el flujo de vehículos pesados.

### 3.5. NORD 2000

Este modelo, originario de los Países Bajos, cuenta con su última actualización en el año 2000 [10].

Este modelo considera una distancia de referencia a la fuente sonora de 10 metros y una altura de referencia sobre la calzada de 1,5 metros. El modelo NORD 2000 considera un flujo de vehículos compuesto por vehículos ligeros y vehículos pesados.

$$L_{RE} = L_{AE,Qi} + C_{vel} + C_{pav} + C_{traf} \quad (7)$$

Dónde:

- $L_{RE}$  es la suma de los niveles sonoros básicos para cada tipo de vehículos situados a 10 metros en un periodo de una hora.
- $C_{vel}$  es la corrección respecto de la velocidad en función del tipo de vehículo.
- $C_{pav}$  es la corrección debida a la superficie de la carretera.
- $C_{traf}$  es la corrección debida a la intensidad de circulación.

$$L_{AE,Qi} = L_{AE,10m} + 10 \log \left( \frac{Q_i}{T} \right) \quad (8)$$

Dónde:

- $L_{AE,10m}$  es el nivel sonoro del tipo de vehículo evaluado.
- $Q_i$  es el caudal de vehículos por cada tipología
- $T$  es el tiempo de evaluación

$$L_{AE,10m}(\text{Ligeros}) = 73,5 + 25 \log_{10} \left( \frac{v}{50} \right) \text{ para } v > 40; v < 40 \quad L_{AE,10m} = 71 \text{ dB}$$

$$L_{AE,10m}(\text{Pesados}) = 81 + 30 \log_{10} \left( \frac{v}{50} \right) \text{ para } v > 50; v < 50 \quad L_{AE,10m} = 81 \text{ dB}$$

### 3.6. NMPB ROUTES 08

El modelo francés NMPB tiene en cuenta que entre el receptor y la fuente existen diferentes caminos en función del relieve del terreno, posibles obstáculos presentes, etc., por los que se puede llegar de uno a otro. Dentro de las variables meteorológicas se pueden distinguir las condiciones favorables para la propagación y las condiciones acústicas homogéneas [19] [20].

En el modelo francés, la potencia acústica se evalúa considerando el paso por hora de un vehículo pesado o ligero. Dentro de este método, en la trayectoria existente entre la fuente y el receptor se tienen en cuenta diferentes atenuaciones debidas a la propagación geométrica, la absorción atmosférica y las atenuaciones límite que son aquellas que dependen del efecto suelo y la difracción [19] [20].

Este modelo considera una distancia de referencia de 7,5 metros. Siendo un vehículo ligero aquel que pesa menos de 3500 kg y un vehículo pesado aquel con una masa de más de 3500 kg.

$$L_{AW} = 10 \cdot \log_{10} \left( (L_l + (10 \cdot \log_{10} Q_l)) + (L_p + (10 \cdot \log_{10} Q_p)) \right) \quad (9)$$

Dónde:

- $L_l$  es el nivel de emisión de ruido que corresponde a un vehículo ligero por hora.
- $L_p$  es el nivel de emisión de ruido que corresponde a un vehículo pesado por hora.
- $Q_l$  es el caudal de vehículos ligeros por hora.
- $Q_p$  es el caudal de vehículos pesado por hora.

### 3.7. CNOSSOS-UE

Como se ha comentado en los apartados anteriores, existe una variedad de modelos para evaluar el nivel de ruido del tráfico rodado. Cada uno de estos modelos, además, utiliza diferentes correcciones. Con la finalidad de unificar esta variedad de resultados, la Unión Europea ha lanzado algunos proyectos como pueden ser CNOSSOS [21].

En el año 1996 se planteó en Europa la implantación de una serie de medidas y políticas más estrictas con respecto a la contaminación acústica y reducción del ruido ambiental. De esta manera, se publicó el Libro Verde sobre la política futura de lucha contra el ruido [22].

Fue en el año 2002 cuando se aprobó una ley regulatoria sobre la contaminación acústica, la Directiva 2002/49/CE [1]. Lo que se persigue con esta Directiva es controlar a la vez que cuantificar el nivel de ruido ambiental existente y la puesta en conocimiento a la sociedad de estos datos recogidos. Esto se consigue mediante la elaboración de mapas estratégicos de ruido (MER). Los MER se deben realizar en aquellos lugares con “aglomeraciones de más de 100.000 habitantes, para todos los ejes viarios con más de 3.000.000 de desplazamientos al año, para todos los ferrocarriles con más de 30.000 desplazamientos al año y para todos los aeropuertos con más de 50.000 operaciones anuales” [2].

Si nos centramos en el caso particular de España, la Directiva 2002/49/CE se recogió en la Ley 37/2003, de 17 de noviembre. Al igual que la ley europea, la ley española tenía como finalidad reducir el nivel de ruido y contaminación acústica. Más tarde, en el año 2005 se aprobó el Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, que fijaba aspectos en cuanto a la evaluación del ruido ambiental [2].

La elaboración de los mapas estratégicos de ruido es obligatoria en aquellos países que formen parte de la Unión Europea, desde el año 2007. Esto se recoge en la Directiva sobre ruido ambiental (2002/49/EC) [1]. Siendo a partir de 2009 cuando la CE decidió poner en marcha y comenzar con CNOSSOS.

La preocupación por la implementación de un método de predicción de ruido común proviene del año 2009, fecha en la cual la Comisión Europea expuso

CNOSSOS para la predicción de diferentes tipos de ruido [4]. El objetivo que persigue la Comisión Europea es la de conseguir una armonización e igualdad en el modelo que se sigue a la hora de evaluar los niveles de ruido y cómo influyen estos en la calidad de vida de los ciudadanos.

Este modelo (CNOSSOS) fue estudiado en un periodo comprendido entre 2009 y 2012 por diferentes agrupaciones como los Servicios de la Comisión Europea, la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA), la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA), la Organización Mundial de la Salud (OMS-Europa) y cerca de 150 expertos en ruido [23].

Dentro de esta preocupación por desarrollar un único modelo, se pueden distinguir dos fases:

- Una primera fase en la que sirvieron los conocimientos y experiencia que poseían las organizaciones anteriormente citadas para desarrollar el marco del modelo de predicción de ruido CNOSSOS.

De esta manera, se describen los objetivos que se persiguen y que posteriormente se tienen que cumplir en el modelo de predicción de ruido, así como conseguir modelar los diferentes tipos vehículos convirtiéndolos en fuentes de ruido que emanen la misma cantidad de ruido que el vehículo original. Además, se persigue conseguir una buena modelización de la propagación sonora. [23]

Para implantar el marco del modelo de predicción de ruido de CNOSSOS, se propusieron algunos de los métodos europeos que ya existían y tomarlo como base para conseguir este fin. Por este motivo, se valoraron opciones de métodos de predicción como NMPB 2008 [19] [20] o HARMONOISE. [24]

Para decantarse por un método u otro se siguen una serie de criterios como pueden ser la exactitud y veracidad de los resultados obtenidos, el tiempo de ejecución de los cálculos que emplea cada uno de los métodos considerados, el número de parámetros utilizados o la simplicidad del método empleado. [23]

Tras utilizar diferentes elementos con el fin de determinar que método era el adecuado y el cual serviría de base para el desarrollo del marco

de CNOSSOS, se obtiene que cada uno de los tres métodos comentados con anterioridad con más precisos dependiendo de las características que se estén considerando.

Sin embargo, finalmente se decidió optar por el método francés NMPB 2008 para llevar a cabo el desarrollo del marco del modelo de predicción de ruido de CNOSSOS [23].

- En la segunda parte del estudio, se busca implementar todo aquello que se ha desarrollado de manera teórica en la primera fase. De esta manera, se buscan una serie de valores de entrada con los que el método CNOSSOS pueda trabajar. [23]

Este método europeo de predicción de ruido trabaja con frecuencias que oscilan entre 125 Hz y 4 kHz, en el caso de que se esté considerando el estudio de tráfico rodado. Si se quiere estudiar otro tipo de niveles de ruido como pueden ser el industrial o el ruido de aviones, las frecuencias se encuentran comprendidas desde 63 Hz hasta 4 kHz y desde 50 Hz hasta 10 kHz, respectivamente. Posteriormente, se optó por ampliar el rango de frecuencias haciendo oscilar estas entre 63 Hz y 8 kHz en bandas de octava. [23].

Con la aparición del modelo europeo CNOSSOS, todos los países de la Unión Europea están obligados a utilizar el mismo modelo de predicción de ruido, considerando a su vez los mismos criterios y mismas correcciones a la hora de elaborar los mapas estratégicos de ruido, cuya elaboración en los países de la Unión Europea es obligatoria.

El modelo de predicción CNOSSOS parte de la combinación de los modelos de predicción de Imagine [25] en su modelo fuente y el modelo de predicción francés NMPB ROUTES para el submodelo de propagación [19] [20].

Este modelo considera una distancia de referencia a la fuente sonora de 7,5 metros y una altura de referencia sobre la calzada de 1,2 metros. Este modelo considera un flujo de vehículos compuesto por vehículos ligeros, vehículos semipesados, vehículos pesados, ciclomotores o triciclos y motocicletas, incluyendo una categoría abierta por si en futuro hubiera que crear una nueva clase.

Para determinar el nivel de ruido global del tráfico rodado lo hace mediante la suma del ruido producido por los vehículos de manera individual. Se realiza una clasificación de los vehículos en 5 categorías:

Categoría de vehículo	Nombre de la categoría	Descripción de la categoría
1	Vehículos Ligeros	Turismos, Furgones de reparto menos de 3500 kg incluyendo remolques y caravanas
2	Vehículos de peso medio	Furgones de reparto superiores a 3500 kg, autobuses, caravanas, etc.
		Con dos ejes y doble montaje neumático con eje trasero
3	Vehículos Pesados	Camiones, autobuses, caravanas, con tres ejes como mínimo
4a	Vehículos de dos ruedas	Ciclomotores, triciclos o quads inferiores a 50 c.c.
4b		Motocicletas, triciclos o quads superiores a 50 c.c.
5	Categoría abierta	Por si en el futuro hiciera falta otra categoría.

Tabla 1: Clasificación de vehículos [4].

En el modelo de CNOSSOS, el cálculo de la potencia sonora se realiza mediante el sumatorio del sonido emitido por cada vehículo de manera individual en un periodo de tiempo de 1 hora. El ruido emitido por el flujo de tráfico en términos de fuente lineal equivalente se puede expresar mediante la siguiente expresión [4]:

$$L_{W_{eq,line}} = L_{W_0} + 10 \log_{10} \left( \frac{Q}{1000 \cdot v} \right) \quad (10)$$

Dónde:

- $L_{W_{eq,line}}$  es el nivel de potencia sonora media por unidad de longitud en dB/m.
- $L_{W_0}$  es el nivel de potencia sonora para cada vehículo.
- $Q$  es el flujo de tráfico en vehículos por hora por cada categoría.
- $v$  es la velocidad del flujo de tráfico bajo estudio por cada categoría.

Los vehículos de estudio, se toman como uno o varios puntos, que emiten el nivel de ruido que sería el correspondiente a la suma del ruido que proviene tanto de la rodadura como de la propulsión del vehículo. Este punto se considera que está a una distancia en perpendicular desde el suelo de 0,05 metros. En esa ubicación se ubica la fuente que emana el nivel de potencia sonora estudiada [4].

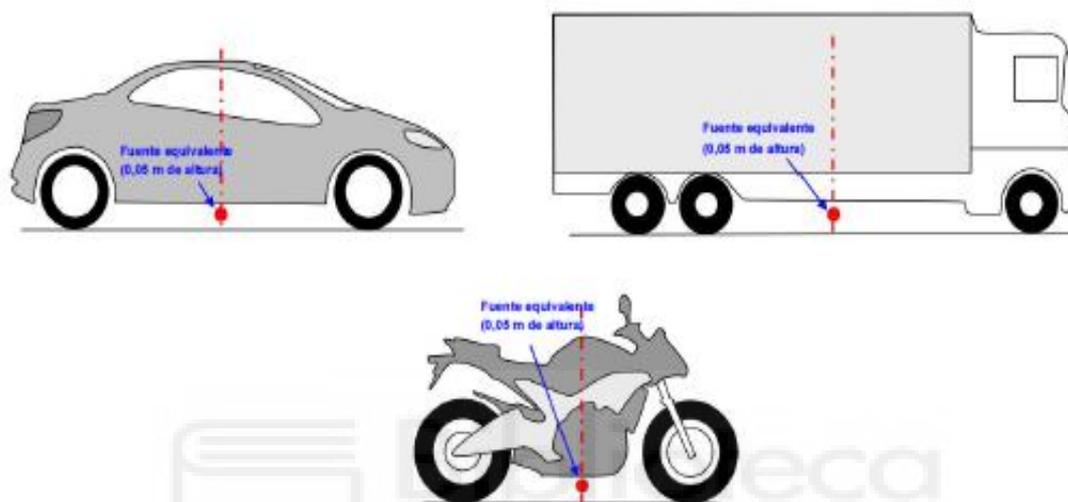


Figura 1: Ubicación de la fuente puntual equivalente en vehículos ligeros, pesados y de dos ruedas [4].

En el caso en el que tengamos en circulación más de un vehículo, la emisión sonora a estudiar corresponde a la suma de las emisiones sonoras correspondientes al número total de vehículos que circulen en el tiempo estimado, obteniendo así un flujo de tráfico.

Dentro de las directrices de CNOSSOS, se establecen unas condiciones de referencia. Estas condiciones hacen que se apliquen una serie de correcciones en el caso que las condiciones de estudio discrepen de las de referencia. Dichas condiciones de referencia son [4]:

- Velocidad de referencia de 70 km/h.
- Temperatura del aire de referencia de 20 °C.
- Carretera plana.
- Edad de la carretera entre 2 y 7 años.
- Los neumáticos que se consideran son sin clavos.

Si bien es cierto que el modelo de predicción ha sufrido algunas actualizaciones. En la primera formulación del método de predicción de CNOSSOS se detectaron imprecisiones y errores. Debido a estas discrepancias, diferentes estudios han centrado sus investigaciones en la mejora del cálculo de este modelo de predicción.

Uno de ellos, elaborado por RIVM, (National Institute for Public Health and the Environment, Países Bajos) [26] se centró en el estudio y mejora del suelo para conseguir reducir el ruido que se genera debido a la rodadura de los vehículos al transitar por la calzada. Por lo tanto, el estudio proporciona una nueva tabla con los valores modificados para las diferentes categorías de  $A_{R,i,m}$ ,  $B_{R,i,m}$ ,  $A_{P,i,m}$ ,  $B_{P,i,m}$  (cuyos valores se muestran en el Anejo 1) que son términos utilizados para calcular el nivel de potencia sonora tanto de la rodadura como de la propulsión, respectivamente.

Dentro de estos estudios de mejora, el RIVM también introdujo una serie de modificaciones de CNOSSOS desarrollando textos que no eran del todo aclaratorios y que podían llevar a confusiones o interpretaciones incorrectas. Siguiendo con el mismo objetivo, también se introdujeron cambios en lo que a expresiones se refiere, modificando, por ejemplo, la expresión para calcular el nivel de potencia sonora emitida por el vehículo, considerando a este como una fuente lineal [26].

#### **4. OBJETIVOS**

El objetivo del presente proyecto consiste en evaluar la contribución sonora de los autobuses urbanos, tanto térmicos como eléctricos, que circulan en la ciudad de Elche, empleando para ello una adaptación del actual modelo de predicción sonora CNOSSOS. Mediante el registro de rutas vía GPS, se pueden comparar los niveles sonoros de los vehículos circulando por rutas repetitivas, comparando así la contribución sonora en función de las condiciones del tráfico, modo de conducción y sistemas de propulsión, pudiéndose añadir otros datos de menor repercusión sonora pero evaluables de cara a los objetivos la Agenda 2030 de la Unión Europea.

Para ello se siguen las siguientes partes:

- Adaptación del modelo de predicción CNOSSOS a las variantes de vehículos eléctricos, utilizando para ello el lenguaje de programación MATLAB.
- Toma de datos de velocidad, latitud y longitud, mediante GPS incorporado en dispositivo móvil de gama media-alta.
- Toma de medidas de manera experimental de autobuses urbanos térmicos y eléctricos, utilizando para ello un sonómetro Integrador tipo 1.
- Obtención de resultados mediante el uso del software IMMI, para cuantificar las mejoras de la introducción de vehículos eléctricos, así como de habitantes afectados por dicho motivo,

## 5. FASE COMPUTACIONAL EN MATLAB

De esta manera, en este apartado, se tienen en cuenta las directrices que marca la Unión Europea acerca de este modelo [4]

Dentro del estudio, se distinguen dos bloques de cálculo. Por un lado, se contempla la emisión de ruido por parte de los vehículos, lo que se denomina como modelo fuente. Una vez obtenido ese primer resultado, se aplicarán las diferentes correcciones que se establecen en CNOSSOS como motivo del estado de la carretera, condiciones de humedad, temperatura, etc, conociéndose este como el modelo de propagación. [4].

### 5.1. ESTUDIO DE POTENCIA SONORA EN EL TRÁFICO RODADO

La emisión sonora que emite un vehículo en circulación está compuesta por el ruido de rodadura que emana del contacto del neumático con el suelo durante su circulación, mientras que el ruido de propulsión corresponde al ruido que proviene del sistema de propulsión que emplea el vehículo.

Estos dos términos se combinan en el punto considerado a 0,05 metros de altura, mediante la siguiente expresión [4]:

$$L_{w,i,m} = 10 \cdot \log \left( 10^{\frac{L_{WR,i,m}}{10}} + 10^{\frac{L_{WP,i,m}}{10}} \right) \quad (11)$$

Dónde:

- $L_{w,i,m}$  corresponde a la potencia sonora total del vehículo.
- $L_{WP,i,m}$  corresponde a la potencia sonora que proviene de la propulsión del vehículo.
- $L_{WR,i,m}$  corresponde a la potencia sonora que proviene de la rodadura del vehículo.

#### 5.1.1. POTENCIA SONORA DE RODADURA

La expresión que se utiliza para el cálculo del nivel ruido que proviene de la rodadura del vehículo es la que se muestra a continuación [4]:

$$L_{WR,i,m} = A_{R,i,m} + B_{R,i,m} \cdot \log \left( \frac{v_m}{v_{ref}} \right) + \Delta L_{WR,i,m} \quad (12)$$

Dónde:

- Los términos  $A_{R,i,m}$  y  $B_{R,i,m}$  dependen de la categoría del vehículo y se definen en bandas de octava reflejados en el ANEJO I [4].
- $v_m$  es la velocidad con la que circula el vehículo.
- $\Delta L_{WR,i,m}$  son una serie de correcciones que hay que aplicar en función de la edad de la calzada, la temperatura del aire, la humedad de la calzada y la anchura del neumático.

#### 5.1.1.1. CORRECCIÓN PARA LA EDAD DE LA CALZADA

Este término hace referencia al estado de la calzada sobre la que circulan los vehículos. Debido al uso al que ha sido sometida la calzada, esta puede estar descolchada o tener diferentes cotas. Así mismo, la calzada se endurece con el paso del tiempo debido a la circulación de los vehículos que transitan sobre ella [4]. Esta corrección no se aplica a las calzadas que sean de los tipos 4 o 5. Además, se trata de una corrección a aplicar en aquellas calzadas que tengan una edad que sea mayor o igual a 7 años. En caso de que la edad de la calzada sea menor a 7 años, este término se considerará nulo. La expresión de la corrección para la edad de la calzada es la siguiente [4]:

$$\Delta LWR_{age} = pondA \cdot (1 - (0,25 \cdot year - 0,016 \cdot year^2)) \quad (13)$$

Dónde:

- $pondA$  es el término que corresponde a la corrección para la adaptación al oído humano.
- $year$  es el término que corresponde a la edad de la calzada de estudio.

#### 5.1.1.2. CORRECCIÓN PARA LA TEMPERATURA DEL AIRE

Se debe tener en cuenta que cuanto menor sea la temperatura del aire, menor es la potencia sonora que genera la rodadura del vehículo con la calzada [4]. Como se ha comentado anteriormente, la temperatura que se toma como temperatura de referencia es de 20°C. Cualquier temperatura que sea distinta a la de referencia, se debe someter a una corrección que permite corregir la potencia sonora de rodadura. La expresión correctiva comentada es la siguiente [4]:

$$\Delta LWR_{W,temp}(\tau) = K \cdot (20 - \tau) \quad (14)$$

Dónde:

- $\tau$  corresponde a la temperatura considerada del aire.
- $K$  es un valor que depende de diferentes factores. A modo de simplificación, se puede tomar un valor de 0,08 dB/°C para vehículos de categoría 1 o de 0,04 dB/°C para aquellos vehículos pesados que pertenecen a las categorías 2 y 3 [4].

#### 5.1.1.3. CORRECCIÓN PARA LA HUMEDAD DE LA CALZADA

Para esta corrección se define el parámetro de la frecuencia de referencia ( $f_0$ ). Este valor tiene un valor de 1000 Hz. Esta corrección se considera en aquellas situaciones en las que la humedad tenga un valor mínimo de 20%. Por contra, en las situaciones donde el valor de la humedad sea inferior al 20%, esta corrección no se considera (se considera con un valor nulo) [4]. La expresión a usar es la siguiente [4]:

$$\Delta LWR_{wet} = \max \left[ 15 \cdot \log_{10} \left( \frac{f}{f_0} \right) - 12 \cdot \log_{10} \left( \frac{v}{v_{ref}} \right) - 48, 0 \right] \cdot phumedad \quad (15)$$

Dónde:

- $f$  es la frecuencia central de banda de octava en Hz.
- $f_0$  es la frecuencia de referencia en Hz.
- $v$  es la velocidad a la que circula el vehículo.
- $v_{ref}$  se encuentra definida en el apartado de “condiciones de partida”.
- $phumedad$  es el porcentaje de humedad que posee la calzada.

#### 5.1.1.4. CORRECCIÓN PARA LA ANCHURA DEL NEUMÁTICO

Esta corrección se rige por la siguiente expresión [4]:

$$\Delta LWR_{wid} = -[0,04 \cdot (Wt - 187)] \quad (16)$$

Dónde:

- $Wt$  es el ancho del vehículo que se considera.

Sin embargo, para los vehículos incluidos en la categoría 3, esta corrección toma un valor de 0.

#### 5.1.1.5. CORRECCIÓN DE LA CALZADA

La expresión para esta corrección es la siguiente [4]:

$$\Delta LWR_{road} = \alpha + \beta \cdot \log_{10} \left( \frac{v}{v_{ref}} \right) \quad (17)$$

Dónde:

- Los términos  $\alpha$  y  $\beta$  dependen del tipo de suelo y se definen en bandas de octava reflejados en el ANEJO 1.
- La tabla tipos de suelo queda reflejada en el ANEJO 1.

#### 5.1.2. POTENCIA SONORA DEL MOTOR

Una vez abarcada la rodadura del vehículo, se procede a estudiar la propulsión como otra fuente de emisión sonora. Como su propio nombre indica, dentro de este apartado se considera el ruido que proviene de aquellos elementos que sirven de propulsión a los vehículos.

Si bien es cierto que, en los últimos años ha aumentado la preocupación por la preservación y mejora de las condiciones del ambiente que nos rodea. En este sentido, varias son las normativas que obligan a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera como principal contaminante de la misma, además de otros elementos que se expulsan a la atmósfera durante la propulsión de los vehículos que utilizan motor de combustión. Es debido a ello, junto a una mayor concienciación de la sociedad, que los vehículos eléctricos toman relevancia a la hora de elegirlos como medios de transporte.

Siguiendo la metodología del modelo de predicción CNOSSOS, se procede a desarrollar la contribución del ruido de propulsión del vehículo. Si bien es cierto que, si se elige como medio de transporte un vehículo electrificado, la componente del nivel de potencia correspondiente a la propulsión es nula.

La expresión general para calcular la potencia sonora de propulsión del vehículo es la siguiente [4]:

$$L_{WP,i,m} = A_{P,i,m} + B_{P,i,m} \cdot \frac{(v_m - v_{ref})}{v_{ref}} + \Delta L_{WP,i,m}(v_m) \quad (18)$$

Dónde:

- Los términos  $A_{P,i,m}$  y  $B_{P,i,m}$  se utilizan en bandas de octava definidos en el ANEJO 1.
- $v_m$  es la velocidad con la que circula el vehículo.
- $v_{ref}$  es la velocidad de referencia definida en el apartado “Condiciones de referencia”.
- $\Delta L_{WP,i,m}$  son una serie de correcciones que hay que aplicar en función de la velocidad a la que circula el vehículo.

#### 5.1.2.1. CORRECCIÓN TIPO DE CALZADA

Al igual que para la rodadura, se define en propulsión un término para la corrección del tipo de calzada, siendo el tipo *Thin Layer A* el tipo de calzada escogido para dicho proyecto. Sigue la siguiente expresión [4]:

$$\Delta LWP_{road} = \min(alfa, 0) \quad (19)$$

Dónde:

- El término *alfa* se utiliza en bandas de octava definidos en el ANEJO I [4].

#### 5.1.2.2. OTRAS CORRECCIONES

Existen además diferentes tipos de correcciones a aplicar en este apartado. Si bien es cierto que, estas dos correcciones que se definen a continuación, únicamente se aplican a la categoría de vehículos 1 (vehículos ligeros), no aplicables a la categoría 3 (vehículos pesados). Estas dos correcciones son las debidas a la presencia de furgonetas y de vehículos diésel [4].

##### 5.1.2.2.1. CORRECCIÓN DE FURGONETAS

La corrección debida a la presencia de furgoneta tiene la siguiente expresión [4]:

$$\Delta LWP_{vans} = \frac{5 \cdot (pvans - 10.5)}{100} \quad (20)$$

Dónde:

- $p_{vans}$  es el porcentaje de furgonetas dentro de la categoría 1.

#### 5.1.2.2.2. CORRECCIÓN DE VEHÍCULOS DIESEL

La corrección debida a la presencia de vehículos diésel tiene la siguiente expresión [4]:

$$\Delta LWP_{diesel} = \frac{3 \cdot (pdiesel - 19)}{100} \quad (21)$$

Dónde:

- $pdiesel$  es el porcentaje de vehículos diésel dentro de la categoría 1.

#### 5.2. ESTUDIO DE LA PROPAGACIÓN SONORA

Una vez estudiadas las diferentes componentes que conforman la potencia sonora, se estudia de qué manera se propaga la misma, considerando la fuente como una de tipo lineal. En este modelo, la evaluación del nivel del ruido por parte del tráfico se desarrolla mediante la propagación del sonido desde la fuente hasta el receptor en un único plano de propagación [27] para niveles equivalentes por hora mediante:

$$L_{Eqh} = L_w + \Delta C \quad (22)$$

Dónde:

- $L_w$  es la suma de los niveles sonoros básicos para cada tipo de vehículos. Este término, como se puede ver en el apartado anterior, a su vez se compone de la siguiente manera:

$$L_i(v) = A_i + B_i \cdot f(v) \quad (23)$$

En este apartado, se tratará la propagación del sonido en los modelos de predicción de ruido mencionados anteriormente. La propagación, de manera general para los diferentes modelos de predicción de ruido sigue las directrices según la Norma ISO-9613 [27].

La metodología parte de la emisión acústica de una fuente de ruido en bandas de octava normalizadas,  $L_{wi}$ , a la que posteriormente se le aplicarán diferentes factores de corrección.

$$L_{pi} = L_{wi} - A_i \quad (24)$$

Dónde:

- $L_{pi}$  es el nivel de presión sonora de corto plazo correspondiente a la banda de octava  $i$ .
- $L_{wi}$  es el nivel de potencia sonora correspondiente a la banda de octava  $i$ .
- $A_i$  es la atenuación correspondiente a la banda de octava  $i$ .

Además, hay que tener en cuenta los factores que dependen de las condiciones meteorológicas donde se están realizando los ensayos, corrigiendo por tanto el término  $L_{pi}$ :

$$L_{pi} = L_{pi} - C_{met} \quad (25)$$

Dónde:

- $L_{pi}$  es el nivel de presión sonora de corto plazo correspondiente a la banda de octava  $i$ .
- $C_{met}$  es la corrección debido a las características meteorológicas medias del lugar de evaluación, considerando además la distancia entre fuente y receptor y la altura de ambos.

La Norma ISO 9613 [27], además tiene en cuenta una serie de atenuaciones que corresponden a la divergencia geométrica, las condiciones del terreno, reflexiones, etc. Las atenuaciones que se consideran son:

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{barr} + A_{fol} + A_{site} + A_{hous} \quad (26)$$

Dónde:

- $A_{div}$  es la divergencia geométrica en dB.
- $A_{atm}$  es la divergencia debido a la absorción atmosférica en dB/octava.
- $A_{gr}$  es la divergencia debido al efecto del terreno en dB/octava.
- $A_{barr}$  es la divergencia debido a la presencia de barreras en dB/octava.

- $A_{fol}$  es la divergencia debido a la vegetación.
- $A_{site}$  es la divergencia debido a la presencia de emplazamientos industriales en dB/octava.
- $A_{hous}$  es la divergencia debido a la presencia de edificaciones en dB/octava.

La Norma ISO 9613 [27] ofrece una manera para calcular cada uno de los términos anteriores, los cuales se pueden usar para conocer cada una de las atenuaciones anteriormente citadas, conociendo las características de la fuente emisora, del terreno y la distancia existente a la ubicación sea de interés.

### 5.2.1. CONDICIONES METEOROLÓGICAS

La Norma ISO 9613 [27] considera que la velocidad del viento no debe superar en ningún caso los 5 m/s, durante un periodo de tiempo para el cual las condiciones meteorológicas se puedan considerar representativas. Además, deben existir unas condiciones de atmósfera neutra, inestable o de inversión térmica moderada.

La atmósfera neutra existe cuando la presencia de nubes dificulta el enfriamiento o calentamiento rápido de la superficie.

Una atmósfera inestable la encontramos en aquellos días soleados, fuerte insolación y con bajas velocidades del viento.

### 5.2.2. DIVERGENCIA GEOMÉTRICA

Para la atenuación por divergencia geométrica, se establece que el sonido se reduce debido a la distancia a la que se encuentre la fuente receptora [27]:

$$A_{lineal} = 10 \cdot \log_{10}(r) + 11 - ID \quad (27)$$

Dónde:

- $r$  es la distancia en perpendicular existente entre el vehículo y el elemento que capta la potencia sonora.
- $ID$  es el valor del índice de directividad de la fuente. La fuente lineal, se puede considerar como una fuente ubicada en un plano, siendo el valor de  $ID$  de 3 [28].

Por lo tanto, la expresión anterior queda de la siguiente manera:

$$A_{lineal} = 10 \cdot \log_{10}(r) + 8 \quad (28)$$

### 5.2.3. ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA

Esta atenuación depende de la temperatura y de la humedad relativa del ambiente. Además, en este tipo de atenuación, sólo se tienen en cuenta las altas frecuencias y a grandes distancias (siempre menores a 250 metros), debido a que las bajas frecuencias no experimentan prácticamente absorción por parte de la atmósfera. Esta atenuación sigue la siguiente expresión [27]:

$$A_{atm} = \frac{\alpha_{atm} \cdot d}{1000} \quad (29)$$

Dónde:

- $\alpha_{atm}$  es el coeficiente de atenuación atmosférica [4]. Los valores de este parámetro se definen en el ANEJO 1. Estos valores se dan para unas condiciones determinadas de temperatura (15°C), humedad relativa (70%) y presión (101325 Pa).
- $d$  es la distancia en perpendicular existente entre el vehículo y el elemento que capta la potencia sonora.

### 5.2.4. ABSORCIÓN DEL TERRENO

En este apartado, se tiene en cuenta la porosidad y el tipo de cobertura que posee el terreno que se encuentra entre emisor y receptor [27].

Este método para calcular la absorción del terreno solo es válido cuando el terreno es relativamente plano, pudiendo ser este totalmente horizontal o siguiendo una pendiente constante.

Las propiedades relacionadas con la absorción del terreno se representan mediante un coeficiente  $G$ , pudiendo variar entre 0 y 1. En la siguiente tabla, se muestran algunos ejemplos de  $G$ :

Tipos de suelo	Coeficiente factor de suelo
Muy suave	1
Suelo de bosque blando	1
Suelos no compactos	1
Campo compactado y grava	0,7
Compactado denso	0,3
Superficies duras (asfalto normal)	0
Muy duro y denso (hormigón asfáltico)	0

Tabla 2: Valores de coeficientes del factor suelo [4].

#### 5.2.5. ATENUACIÓN POR APANTALLAMIENTOS

Este tipo de atenuación solo se tiene en cuenta cuando el tamaño del obstáculo entre emisor y receptor es mayor que la longitud de onda de la frecuencia central de la banda de interés.

También se debe tener en cuenta la altura del emisor y del receptor, la distancia que existe entre ellos y los fenómenos de difracción.

#### 5.2.6. TÉRMINO DEBIDO A LA PONDERACIÓN A

Por último, hay que considerar la ponderación A. Dicha corrección se utiliza para ajustar el ruido al rango audible por el ser humano.

Por lo tanto, para calcular y obtener el valor resultante del nivel de presión sonora, se tienen que restar las diferentes divergencias contempladas en el apartado 5.2 y sumar el término debido a la ponderación A al nivel de potencia sonora.

#### 5.2.7. CORRECCIÓN METEOROLÓGICA PARA PERIODOS PROLONGADOS

Para periodos de tiempo prolongados, la Norma establece una corrección para aplicar a los niveles sonoros esperados y minorarlos.

Una vez emitido el sonido, los receptores captan el resultado que ha sufrido el sonido a través de la trayectoria emisor-receptor. De esta manera, a los receptores no les es sencillo realizar una valoración de manera objetiva.

Por lo tanto, se debería estudiar si esta minoración se debe aplicar en el caso del ruido proveniente del tráfico para considerar que los niveles sonoros predichos no sucederán durante todo el tiempo considerado.

### 5.3. FUENTE LINEAL

En el estudio se considera la fuente como una de tipo lineal. Este aspecto se utilizará tanto en los apartados de MATLAB como en el de IMMI, los cuales se explicarán más adelante.

Al considerarse una fuente lineal, ya no se tiene en cuenta únicamente el paso de un vehículo de manera singular, si no que se utiliza un caudal o flujo de tráfico.

Siguiendo el modelo de predicción de ruido CNOSSOS, el cálculo de la potencia sonora considerando la fuente como lineal es la siguiente [4]:

$$L_{w,lineal} = L_{w,i,m} + 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{Q}{1000 \cdot v} \right) \quad (30)$$

Dónde:

- $L_{w,lineal}$  es la potencia sonora correspondiente al flujo de vehículos.
- $L_{w,i,m}$  es la potencia sonora correspondiente a un vehículo de manera individual.
- $Q$  es el flujo de vehículos en vehículos/hora.
- El número 1000 cambia las unidades de velocidad al sistema internacional (km/h).
- $v$  es la velocidad considerada en km/h.

Con lo comentado en los subapartados de este punto, se procede a la elaboración de un programa elaborado en MATLAB. Como resultados, esta programación muestra el nivel de presión sonora percibida por los ciudadanos como resultado de la circulación de autobuses tanto térmicos como eléctricos.

De esta manera, cuando se programa CNOSSOS para el caso del autobús térmico se seguirán las expresiones contenidas dentro del propio modelo [4]. Por otro lado, cuando se desarrollen las expresiones para describir el comportamiento del autobús eléctrico, se tomarán únicamente las expresiones que traten sobre la rodadura del autobús, despreciando aquellas que estén relacionadas con la propulsión.

Para realizar esta programación en MATLAB, se ejecutarán diferentes scripts.

El primer script, proporciona el nivel de potencia sonora tanto de la componente de propulsión como de la componente de rodadura, así como todas las correcciones a aplicar a cada una de las potencias sonoras.

Además, muestra el caudal de vehículos térmicos asociado a cada una de las velocidades. Estos datos son calculados mediante un fragmento de la expresión (30), como se explica a continuación:

$$L_{w,lineal} = L_{w,i,m} + 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{Q}{1000 \cdot v} \right) \quad (30)$$

Para ello, se tienen en cuenta las unidades de los términos de la expresión anterior que se encuentran entre paréntesis:

$$\frac{Q}{1000 \cdot v} = \frac{\frac{veh}{h}}{\frac{m \cdot km}{km \cdot h}} = \frac{veh}{m} \quad (31)$$

Se puede observar por tanto que la expresión de dentro del paréntesis equivale a un vehículo por unidad de longitud considerada. Por lo tanto, podemos llegar a la siguiente expresión para el cálculo del caudal:

$$Q_{lineal} = \frac{1000 \cdot v}{L} \quad (32)$$

Dónde:

- $Q_{lineal}$  es el caudal calculado.
- 1000 para pasar de km/h a m/s.
- $v$  es la velocidad extraída mediante GPS.
- $L$  es la longitud de un autobús, considerada esta como 10 m.

El cálculo realizado en las líneas anteriores proporciona el flujo de vehículos para el caso de los autobuses térmicos, dado que CNOSSOS contempla únicamente vehículos de propulsión térmica.

Ahora bien, dicho estudio se centra en la repercusión de los autobuses de propulsión eléctrica, por lo que es necesario conocer el flujo de tráfico de los autobuses eléctricos. Con esta finalidad, se establecen unas relaciones entre el vehículo térmico y el eléctrico en base a la potencias sonoras de ambos.

Para ello, se calcula un coeficiente estableciendo una relación de potencias entre el vehículo térmico (propulsión + rodadura) y el vehículo eléctrico (rodadura). Este coeficiente se obtiene como resultado de realizar una resta entre la potencia sonora del vehículo eléctrico y la potencia sonora del vehículo térmico. La unidad de este coeficiente es de dB.

Una vez realizada la resta y obtenida esta relación en dB, se cambian las unidades a W de la siguiente manera:

$$\text{coeficiente } (W) = 10^{\frac{\text{resta (dB)}}{10}} \quad (33)$$

## 6. TRABAJO DE CAMPO

El siguiente paso en la sucesión del proyecto es la toma de diferentes tipos de mediciones. Aquí se hace una distinción entre dos tipos de medidas tomadas.

En primer lugar se toman mediciones de 16 rutas de autobuses en la ciudad de Elche mediante GPS a través de un dispositivo móvil de gama media-alta, obteniendo más tarde un archivo con la recopilación de una serie de datos de localización recogidos. Cada una de las rutas tiene un recorrido aproximado de 7 kilómetros.

Por otro lado, se toman registros sonoros. Para ello se emplea un sonómetro Integrador tipo 1 y se tomará registro de la potencia sonora producida por diferentes autobuses urbanos, tanto térmicos como eléctricos.



*Figura 2: Sonómetro Integrador tipo 1.*

Haciendo uso del sonómetro, las medidas se realizarán a una distancia de 7,5 metros de la fuente de emisión de ruido (en este caso un autobús) y a una altura de 1,2 metros sobre el nivel de la calzada en base a lo indicado por CNOSSOS.

De esta manera, se han tomado medidas en diferentes zonas de la ciudad de Elche, como se puede observar en las figuras siguientes:



Figura 3: Toma de datos en zona Candalix con sonómetro Integrador tipo 1.



Figura 4: Toma de datos en zona MAHE con sonómetro Integrador tipo 1.



*Figura 5: Toma de datos en zona Diagonal del Palau con sonómetro Integrador tipo 1.*

En estas medidas, se ha registrado la presión sonora de los autobuses que pasan por delante del sonómetro siguiendo las condiciones que se muestran:

- Tiempo de periodo de medida: 10 segundos.
- Tiempo de toma y recogida de datos: 1 segundo.

Por lo tanto, para cada una de las medidas recogidas se obtendrán 10 datos de presión sonora, donde tomará importancia la mayor medida, dado que ese instante será el momento en el que el autobús se encuentre justo delante del sonómetro y a una distancia de 7,5 metros de manera perpendicular al mismo, siendo esta la medida de referencia del modelo CNOSSOS. Además, de manera paralela se apunta en un cuaderno el tipo de autobús que circula por delante del sonómetro, tomando nota de la propulsión empleada en cada uno de los vehículos considerados, así como la velocidad aproximada a la que circulan.

### 7.FASE COMPUTACIONAL IMMI

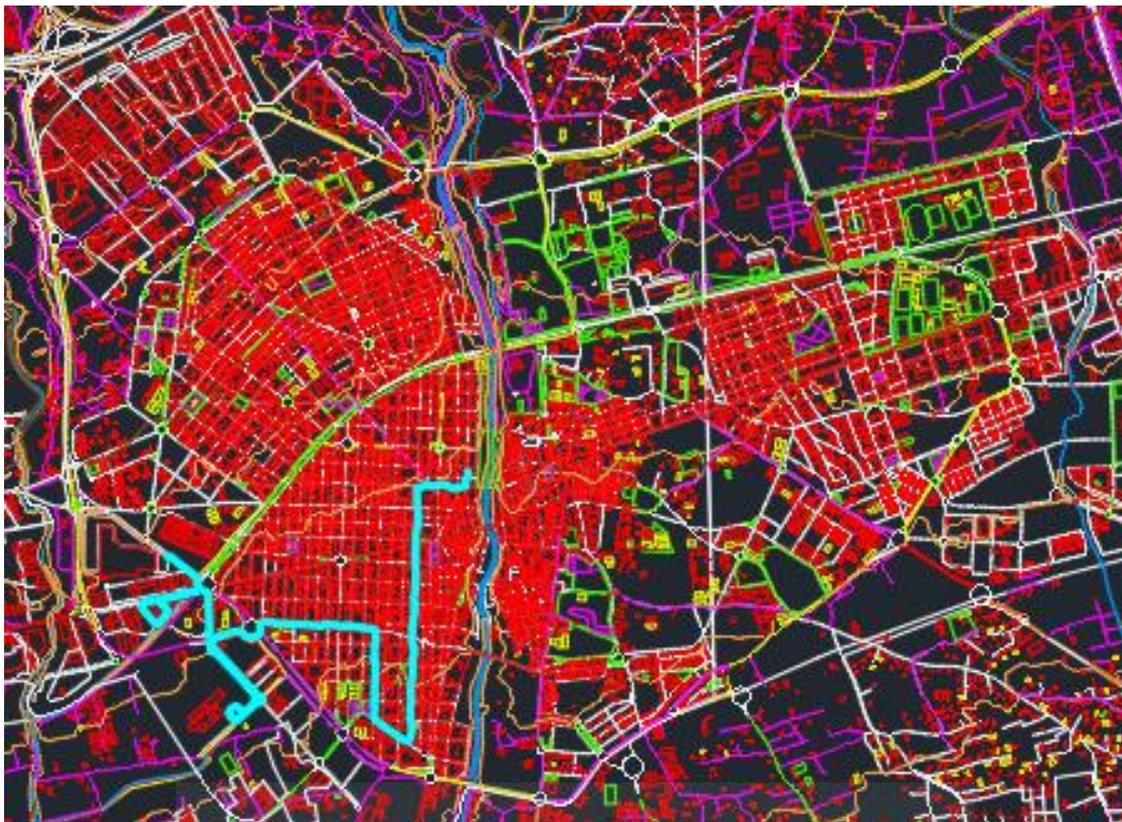
Siguiendo con en el estudio de predicción, medición y evaluación del impacto de la contaminación del ruido del tráfico rodado se emplea el uso del software IMMI. Este pertenece a un paquete de software que se emplea para poder realizar medidas relacionadas con el nivel de ruido en un ambiente exterior, así como la contaminación acústica en diferentes espacios como pueden ser espacios de trabajo, tráfico rodado o aéreo...

El software IMMI se puede utilizar para realizar las siguientes medidas [29]:

- Calcular el ruido industrial.
- Calcular el ruido del tráfico.
- Calcular el ruido del tráfico aéreo.
- Mapas estratégicos de ruido y planes de acción.
- Calcular los contaminantes del aire.

Para poder hacer uso de IMMI, se necesita, en primera instancia, realizar unos pasos previos haciendo uso de AutoCAD. Para ello, es necesario contar con la cartografía de Elche en el software de diseño asistido por ordenador (AutoCAD), al que después se introducirá la ruta seguida por el autobús y registrada por el dispositivo móvil mediante GPS. Para ello, las coordenadas de latitud y longitud tomadas mediante GPS se convierten a coordenadas UTM, para posteriormente ser importadas a la cartografía de la ciudad de Elche.

Debido a la gran cantidad de puntos registrados en cada una de las rutas, se decide realizar una división de la misma en tramos en los que la velocidad sea aproximadamente constante. De esta forma, se tienen dos archivos en AutoCAD, uno con la cartografía de Elche y otro con la ruta seguida por el bus (en diferentes capas) dividida en diferentes tramos:



*Figura 6: Cartografía ciudad de Elche en AutoCAD con ruta del autobús.*

Una vez se tiene el archivo en AutoCAD implementado (cartografía de Elche y ruta del autobús), se guarda con extensión .dxf para que pueda ser abierto desde el software IMMI.

Tras introducir una serie de ajustes iniciales (siguiendo el modelo de predicción CNOSSOS...), procedemos a introducir las condiciones que hemos establecido con anterioridad en el código de MATLAB:

- Altura de la fuente: 0,05 metros.
- Radio de acción: 100 metros.
- Tipo de calzada: Thin Layer A

A continuación, haciendo uso de IMMI, se abre el archivo que contiene la ruta dividida en diferentes tramos según la agrupación realizada anteriormente en AutoCAD. Para cada una de las divisiones establecidas, se introduce la velocidad a la que el autobús circula en dicho tramos, así como el caudal de vehículos pesados correspondiente, según la expresión (32). Una vez se tiene en IMMI la ruta dividida con las velocidades y caudales correspondientes

introducidos en cada uno de los tramos, se introduce dicha ruta en el archivo con extensión .dxf de la cartografía de Elche.

Las rutas llevadas a cabo por los autobuses urbanos de Elche atraviesan distintos barrios de la localidad. Para realizar el cálculo y el análisis de los efectos en los ciudadanos de las circulaciones de los autobuses urbanos, se pueden tener en cuenta 3 métodos distintos. Estos métodos se citan a continuación [30]:

- Estimación END [1]: todas las viviendas que componen el edificio se encuentran expuestas al mismo nivel de ruido. Este nivel de ruido se considera como el que recibe la fachada que se encuentra más expuesta. El ruido se evalúa a 4 metros de altura.
- Mapa de ruido estratégico [31]: mediante este método, a cada fachada se le asigna el valor más colindante del punto de la malla. El ruido se evalúa a 4 metros de altura.
- Mapa de ruido de fachadas: este método no toma el valor más cercano ni toma un valor ya existente en otro punto como referencia. Lo que hace este tercer método es tomar el valor real de nivel de ruido sobre cada fachada considerada. Para ello, distribuye una serie de receptores en concordancia con lo establecido en el método alemán VBEB [32].

De los tres métodos mencionados anteriormente, el método que más se ajusta a lo que realmente se obtiene es el último de ellos, el método VBEB. Por lo tanto, se utilizará este método para conocer cómo y en qué medida afecta el ruido generado por los autobuses eléctricos a los ciudadanos de la ciudad de Elche.

Para realizar el cálculo de la exposición de los ciudadanos del nivel de ruido expuesto, el método VBEB asigna valores de ciudadanos por tramos de fachada, los cuales se encuentran dentro de cada una de ellas. Esta asignación la realiza de manera aproximada atendiendo a una superficie mínima ocupada por cada persona y de la superficie total de la edificación. Cabe destacar que el resultado del cálculo sería más exacto y por lo tanto se tendría un mejor análisis si estos datos de persona por edificio se pudiesen tomar del censo del Ayuntamiento, pero sería un trabajo arduo [33].

Si no se puede acceder al censo para poder consultar los datos requeridos, para calcular el número de personas para cada edificación se sigue la siguiente expresión:

$$EZ_{building} = \frac{G_{building} \cdot GZ_{building}^{0,8}}{WE} \quad (32)$$

Dónde:

- $EZ_{building}$  hace referencia al número de habitantes.
- $G_{building}$  hace referencia al área de la edificación.
- $GZ_{building}$  hace referencia al total de alturas de la edificación.
- $WE$  hace referencia a la asignación de superficie por habitante.

Como resultado del cálculo que realiza el software IMMI, se obtiene que cantidad aproximada de ciudadanos son afectados por un nivel determinado de ruido recibido en la ruta llevada a cabo por el autobús como se puede observar en la figura que se muestra a continuación:

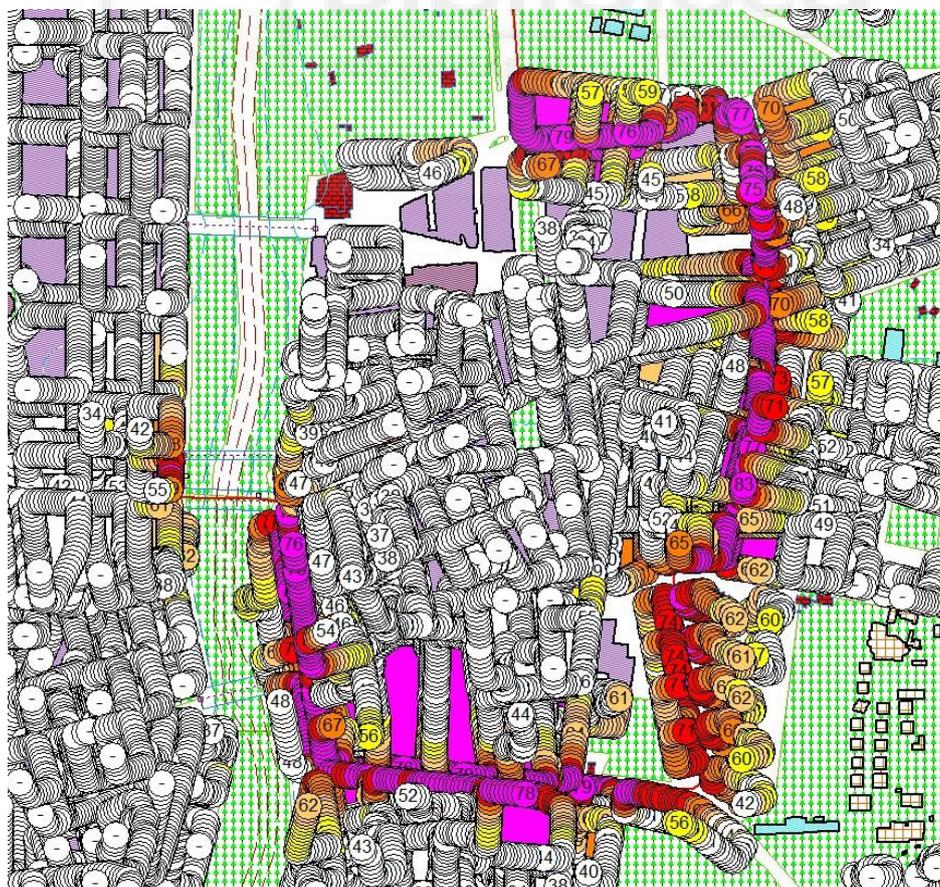
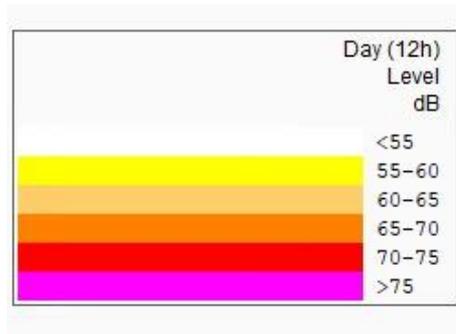


Figura 7: Resultados decibelios IMMI autobús térmico.

En la figura anterior se puede observar un ejemplo del resultado del cálculo desarrollado por el software IMMI, para el caso del autobús térmico (*Figura 7*), obteniendo un resultado diferente para el caso del autobús eléctrico con valores inferiores de presiones sonoras. Las circunferencias de diferentes colores con un número en su interior, que indica el valor de presión sonora en esa ubicación de la ruta del autobús.



*Figura 8: Leyenda cromática resultados IMMI.*



## 8.RESULTADOS

En este apartado se van a presentar cada uno de los resultados y medidas que se han obtenido tanto en la fase de trabajo de campo (GPS y sonómetro) como en ambas fases computacionales (MATLAB e IMMI):

### 8.1. RESULTADOS GPS

Mediante el uso del GPS, se obtienen unos archivos que deben ser exportados a formato .txt para poder ser leídos y posteriormente extraídos. A modo ilustrativo, se muestra una imagen de dicho archivo en el formato final para su apertura:

type	time	latitude	longitude	altitude (m)	speed (km/h)	course	name	desc	url
T	2022-08-01 09:16:48.824	38.268339660	38.268327290	-0.696228900	137.1	1.3	3.8	1 ago. 2022 11:28:28	
T	2022-08-01 09:16:53	38.268327290	38.268318510	-0.696227750	137.5				
T	2022-08-01 09:17:01	38.268318510	38.268325820	-0.696226500	137.8				
T	2022-08-01 09:17:34	38.268325820	38.268317070	-0.696230670	137.9				
T	2022-08-01 09:17:40	38.268317070	38.268319650	-0.696250810	137.0	3.7	4.2		
T	2022-08-01 09:17:41	38.268319650	38.268347020	-0.696289550	134.7	6.4	4.7		
T	2022-08-01 09:17:42	38.268347020	38.268350060	-0.696323870	133.8	7.2	5.1		
T	2022-08-01 09:17:43	38.268350060	38.268334640	-0.696367100	132.2	10.6	5.1		
T	2022-08-01 09:17:44	38.268334640	38.268339060	-0.696406710	131.2	10.5	5.0		
T	2022-08-01 09:17:45	38.268339060	38.268357830	-0.696440780	131.1	9.1	4.9		
T	2022-08-01 09:17:46	38.268357830	38.268381100	-0.696490820	132.7	10.0	5.1		
T	2022-08-01 09:17:47	38.268381100	38.268385960	-0.696504320	133.2	7.5	5.6		
T	2022-08-01 09:17:48	38.268385960	38.268389960	-0.696518570	136.2	3.6	5.7		
T	2022-08-01 09:17:50	38.268389960	38.268402360	-0.696529120	135.6				
T	2022-08-01 09:17:53	38.268402360	38.268410970	-0.696532450	136.1				
T	2022-08-01 09:17:56	38.268410970	38.268423520	-0.696536660	137.1				
T	2022-08-01 09:18:00	38.268423520	38.268432500	-0.696527480	139.5	1.2	5.5		
T	2022-08-01 09:18:01	38.268432500	38.268437920	-0.696517400	140.8	1.4	5.5		
T	2022-08-01 09:18:03	38.268437920	38.268456060	-0.696529490	139.8	2.6	5.6		
T	2022-08-01 09:18:05	38.268456060	38.268490390	-0.696535120	139.2	7.5	5.7		
T	2022-08-01 09:18:06	38.268490390	38.268596800	-0.696552780	137.9	14.0	5.7		
T	2022-08-01 09:18:07	38.268596800	38.268648000	-0.696513220	138.2	20.3	0.2		
T	2022-08-01 09:18:08	38.268648000	38.268743650	-0.696492030	138.8	21.5	0.3		
T	2022-08-01 09:18:09	38.268743650	38.268837340	-0.696562680	141.0	29.7	6.2		
T	2022-08-01 09:18:10	38.268837340	38.268922270	-0.696601420	141.2	32.1	6.2		
T	2022-08-01 09:18:11	38.268922270	38.269016240	-0.696576480	141.1	32.8	6.2		
T	2022-08-01 09:18:12	38.269016240	38.269109940	-0.696614330	139.9	32.0	6.2		
T	2022-08-01 09:18:13	38.269109940	38.269206070	-0.696612260	138.4	32.3	6.3		
T	2022-08-01 09:18:14	38.269206070	38.269286300	-0.696641930	138.8	31.6	6.3		
T	2022-08-01 09:18:15	38.269286300	38.269378910	-0.696642100	139.8	31.7	6.3		
T	2022-08-01 09:18:16	38.269378910	38.269453240	-0.696649150	140.3	33.6	6.3		
T	2022-08-01 09:18:17	38.269453240	38.269544440	-0.696647460	145.4	34.1	0.0		
T	2022-08-01 09:18:18	38.269544440	38.269620770	-0.696648360	142.6	33.8	6.3		
T	2022-08-01 09:18:19	38.269620770	38.269693450	-0.696647360	141.4	31.9	6.2		
T	2022-08-01 09:18:20	38.269693450		-0.696653130	140.6	28.3	6.2		

Figura 9: Registro de datos GPS en formato .txt.

### 8.2. RESULTADOS MATLAB

Como resultado de la adaptación del modelo de predicción a las variantes de vehículos eléctricos, se muestran los valores de presiones sonoras proporcionados por el lenguaje de programación MATLAB para cada una de las agrupaciones que se realizan con las velocidades:

Distancia al sonómetro (m)	Velocidad del autobús (km/h)	Resultados MATLAB dB(A)
7,5	5	47,0
7,5	10	55,7
7,5	15	61,0
7,5	20	64,8
7,5	25	67,8
7,5	30	70,2

Tabla 3: Resultados eléctricos MATLAB.

Cabe destacar que, para el cálculo de las expresiones del modelo CNOSSOS, se han empleado las mismas velocidades que a las que circulaban los autobuses en la fase de medidas con el sonómetro, con el fin de poder validar el modelo de predicción desarrollado para el caso de autobuses eléctricos.

### 8.3. RESULTADOS SONÓMETRO

Para poder acceder y tratar con los datos registrados en el sonómetro, hay que hacer uso del software BZ5503 - Measurement Partner Suite. Una vez extraídos los datos del sonómetro, se recogen en una hoja Excel:

Velocidad del autobús (km/h)	Resultados térmico SONÓMETRO dB(A)
15	76,2
20	69,2
20	70
20	69,9
25	71,2
25	71,3
25	71,3
30	71,6
30	72,1
30	71,5

Tabla 4: Resultados térmicos sonómetro.

Velocidad del autobús (km/h)	Resultados eléctricos SONÓMETRO dB(A)
25	65,1
25	65,2
25	65,6
20	62,1
25	68,9
25	67,3
25	66,2
25	68,6
25	65,3

Tabla 5: Resultados eléctricos sonómetro.

En el Anejo 2, se muestra una tabla donde se muestran todas las medidas realizadas con el sonómetro para ambos casos de propulsión de los autobuses.

Una vez se tienen los resultados de las presiones sonoras del sonómetro y de MATLAB, se puede realizar una validación de la adaptación de CNOSSOS

realizada a los autobuses. De esta manera, basándonos en las medidas obtenidas con el sonómetro, se realizará una comparación con los resultados de presiones sonoras obtenidas en MATLAB.

Para que la adaptación de CNOSSOS se puede aceptar como válida y pueda ser usada como modelo de predicción de los autobuses eléctricos, la diferencia entre estos dos resultados comentados se tiene que encontrar dentro del rango de  $\pm 3$  dB en base a la precisión de CNOSSOS. En caso contrario, el modelo no se consideraría válido y se descartaría. En este estudio, la mayoría de las medidas se encuentran acotadas en el rango de  $\pm 2$  dB.

Es por este motivo por el que a continuación se muestra una tabla resumen con la comparación de presiones sonoras entre el sonómetro y MATLAB:

Distancia al sonómetro (m)	Velocidad del autobús (km/h)	Resultados SONÓMETRO dB(A)	Resultados MATLAB dB(A)	Diferencia
7,5	20	65,1	64,8	0,3
7,5	25	65,2	67,8	-2,6
7,5	20	65,6	64,8	0,8
7,5	20	62,1	64,8	-2,7
7,5	25	68,9	67,8	1,1

Tabla 6: Comparación resultados eléctricos sonómetro-MATLAB.

Por lo tanto, tras realizar la comparación de los resultados de presiones sonoras para el caso del autobús eléctrico, se puede observar como la diferencia entre ambos resultados se halla dentro del rango establecido de  $\pm 3$  dB, dando por válido la adaptación del modelo de predicción de ruido CNOSSOS establecido en MATLAB.

#### 8.4. RESULTADOS IMMI

Para poder llevar a cabo el cálculo de presiones sonoras en IMMI, en primer lugar, se configura el software. En este sentido, se dibuja en IMMI una línea (100 metros) que simula la continuidad de autobuses para así obtener una fuente lineal. A continuación, en el punto medio de esta línea, de manera perpendicular y a una distancia de 7,5 metros se sitúa el receptor.



Figura 9: Configuración IMMI.

El siguiente paso consiste en asignar el caudal correspondiente a diferentes velocidades que puede llevar un autobús, según la agrupación de velocidades realizada. A partir de los caudales de vehículos obtenidos en MATLAB, se realiza un ajuste de este dato para obtener unos resultados de presiones sonoras en IMMI similares a las obtenidas mediante la medida directa con el sonómetro. De esta manera, los caudales de autobuses a introducir en IMMI térmicos y eléctricos obtenidos se muestran en la figura siguiente:

VELOCIDAD (km/h)	CAUDALES	
	CAUDAL ELÉCTRICO INICIAL (veh/h)	CAUDAL TÉRMICO (veh/h)
5	0,1086	250
10	1,4023	500
15	6,3355	750
20	18,4370	1000
25	41,8993	1250
30	81,0583	1500

Tabla 7: Caudales térmicos y eléctricos iniciales.

Por lo tanto, habrá que distinguir dos tipos de presiones sonoras calculadas en IMMI, las que pertenecen a los autobuses de propulsión térmica y las de los autobuses de propulsión eléctrica.

Los resultados de este primer cálculo en IMMI se muestran a continuación:

VELOCIDAD (km/h)	IMMI	
	PRESIÓN SONORA ELÉCTRICO dB(A)	PRESIÓN SONORA TÉRMICO dB(A)
5	39,97	73,59
10	51,07	76,6
15	57,63	78,36
20	62,27	79,61
25	65,45	80,19
30	68,16	80,84

Tabla 8: Resultados presiones sonoras iniciales en IMMI.

De la misma manera que se ha realizado anteriormente, se procede a realizar una comparación de los resultados de presiones sonoras obtenidas en IMMI con las obtenidas en MATLAB.

VELOCIDAD (km/h)	IMMI		MATLAB	
	PRESIÓN SONORA ELÉCTRICO dB(A)	PRESIÓN SONORA TÉRMICO dB(A)	PRESIÓN SONORA ELÉCTRICO dB(A)	PRESIÓN SONORA TÉRMICO dB(A)
5	39,97	73,59	47	77,4
10	51,07	76,6	55,7	77,7
15	57,63	78,36	60,97	78,1
20	62,27	79,61	64,78	78,6
25	65,45	80,19	67,77	79,1
30	68,16	80,84	70,2	79,67

Tabla 9: Comparación presiones sonoras iniciales IMMI-MATLAB.

En la tabla anterior se puede ver como los valores térmicos de presión sonora obtenidos en el programa de cálculo IMMI se ajustan en gran medida a los resultados obtenidos con la adaptación de CNOSSOS elaborado en MATLAB. Pero, por otro lado, si nos fijamos en los valores eléctricos, las medidas obtenidas en IMMI y en MATLAB discrepan para las velocidades más bajas, como se puede observar a continuación:

DIFERENCIA MATLAB-IMMI	
VELOCIDAD (km/h)	ELÉCTRICO
5	7,03
10	4,64
15	3,34
20	2,51
25	2,32
30	2,04

Tabla 10: Diferencia presiones sonoras iniciales IMMI-MATLAB.

Esto se debe a que el programa de cálculo IMMI está programado para realizar cálculos con vehículos térmicos. Por lo tanto, cuando introducimos el caudal de autobuses eléctricos equivalentes, no hay ninguna opción que permita indicar al programa que está trabajando con vehículos eléctricos. Esto hace que, aunque el caudal introducido sea el correspondiente a vehículos eléctricos, el programa siga teniendo en cuenta la componente de la aceleración para el cálculo, tal y como hace con los vehículos térmicos, haciendo que los valores se disparen para las velocidades más bajas, por debajo de 15 km/h. Además, al introducir el caudal de vehículos en la categoría 3, el programa IMMI toma como referencia el motor de un camión pesado, haciendo también que los valores aumenten.

Son por estos motivos, por los que, para obtener unos valores aproximados de presión sonora entre IMMI y MATLAB para la opción eléctrica, hay que variar el caudal de vehículos eléctricos mediante una serie de iteraciones, partiendo del caudal inicial.

En la tabla siguiente se recogen los caudales eléctricos modificados, así como el valor de presión sonora correspondiente para el caso de los caudales eléctricos obtenidos tras las iteraciones:

VELOCIDAD (km/h)	CAUDAL ELÉCTRICO INICIAL (veh/h)	CAUDAL ELÉCTRICO FINAL (veh/h)	PRESIÓN SONORA IMMI CON CAUDALES FINALES dB(A)	PRESIÓN SONORA MATLAB dB(A)
5	0,2172	1,2	47,39	47
10	2,8	10	56,6	55,7
15	12,67	25	60,58	60,97
20	36,87	80	65,63	64,78
25	83,8	150	67,98	67,77
30	162,12	300	70,84	70,2

Tabla 11: Comparación presiones sonoras finales IMMI-MATLAB.

DIFERENCIA MATLAB-IMMI CON CAUDALES TRAS LAS ITERACIONES	
VELOCIDAD (km/h)	ELÉCTRICO
5	-0,39
10	-0,89
15	0,39
20	-0,85
25	-0,21
30	-0,64

Tabla 12: Diferencia presiones sonoras IMMI-MATLAB tras las iteraciones.

De esta manera, con los caudales eléctricos resultantes del proceso de iteración, según la tabla anterior, para cada una de las distintas velocidades, se obtienen valores semejantes según lo calculado en IMMI y en MATLAB, hallándose de nuevo la diferencia entre ambos valores dentro del rango de  $\pm 3$  dB. Esta situación provoca que podamos validar de nuevo la adaptación de CNOSSOS al autobús eléctrico.

### 9. ANÁLISIS

Una vez se obtienen los niveles de potencia sonora en MATLAB, así como las validaciones comprobadas, con el uso de MATLAB e IMMI se obtienen una serie de complementos que ayudan a la comprensión del estudio.

#### 9.1. ANÁLISIS MATLAB

Gracias al registro GPS cada segundo de la velocidad del autobús, así como de la latitud y de altitud, se han obtenido una serie de mapas interactivos. De esta manera se obtienen herramientas más visuales donde es más sencillo analizar diferentes puntos del transcurso de la ruta.

Como el GPS registra datos de velocidad cada segundo, se procede a realizar una agrupación de dichas velocidades. Con esta finalidad las velocidades se agruparán según:

- Desde 0 km/h a 5 km/h se toman como 5 km/h.
- Desde 5 km/h a 10 km/h se toman como 10 km/h.
- Desde 10 km/h a 15 km/h se toman como 15 km/h.
- Desde 15 km/h a 20 km/h se toman como 20 km/h.
- Desde 20 km/h a 25 km/h se toman como 25 km/h.
- Desde 25 km/h a 30 km/h se toman como 30 km/h.
- Para velocidades mayores que 30 km/h se toman como 30 km/h.

En el primera mapa realizado, se muestra la velocidad de circulación del autobús a lo largo de la ruta realizada:



Figura 10: Ruta vehículo-velocidad.

La figura anterior muestra un mapa de la ciudad de Elche centrado en la zona por donde tiene lugar la circulación del autobús. Se puede observar como a la derecha de la imagen existe una columna con diferentes colores que establece una escala de velocidades. El valor de la velocidad es el correspondiente al valor Z que aparece en el mapa mostrado anteriormente.

Cabe destacar que, aunque se ha realizado el registro GPS de 16 rutas distintas, se muestra únicamente una a modo ilustrativo.

Cuando los autobuses eléctricos o híbridos funcionan en modo eléctrico y circulan a bajas velocidades (inferiores a 30 km/h), el ruido que puede llegar a percibir un ciudadano que se encuentra paseando por la ciudad es bajo. Tanto es así que, para evitar cualquier tipo de accidentes debido a este motivo, existe una normativa por la que la UE establece que los vehículos eléctricos tienen que emitir un nivel mínimo de dB, estableciéndose el límite en 56 dB [34].

Para ver la comparación de los decibelios emitidos por un vehículo térmico y uno eléctrico, se exponen en dos mapas interactivos de manera separada los

## ANÁLISIS

valores correspondientes a la potencia sonora emitida por un autobús térmico y por uno eléctrico. El valor de la potencia sonora es el correspondiente al valor Z que aparece en los mapas que se muestran a continuación:



Figura 11: Mapa potencias sonoras vehículo térmico.





Figura 13: Mapa presiones sonoras vehículo térmico.



Figura 14: Mapa presiones sonoras vehículo eléctrico.

Si se comparan los distintos mapas de presiones sonoras, se puede comprobar que tiene una forma similar a los mapas de potencias sonoras. De esta manera, aquellos lugares en los que la potencia sonora sea mayor, también lo será la presión sonora.

Se puede observar por tanto valores superiores de presiones sonoras en diferentes puntos situados en C/ Pedro Juan Perpiñán y valores inferiores de presiones sonoras en puntos que se encuentran en C/ Conrado del Campo y C/ Andreu Castillejos.

## 9.2. ANÁLISIS IMMI

Los resultados que ofrece IMMI pueden ser agrupados y establecer un diagrama de barras que relacionen las diferentes franjas de niveles sonoros en dB(A) con el número de habitantes afectados por cada una de las franjas. A modo de ejemplo, se comentan los resultados correspondientes a una de las rutas de estudio:

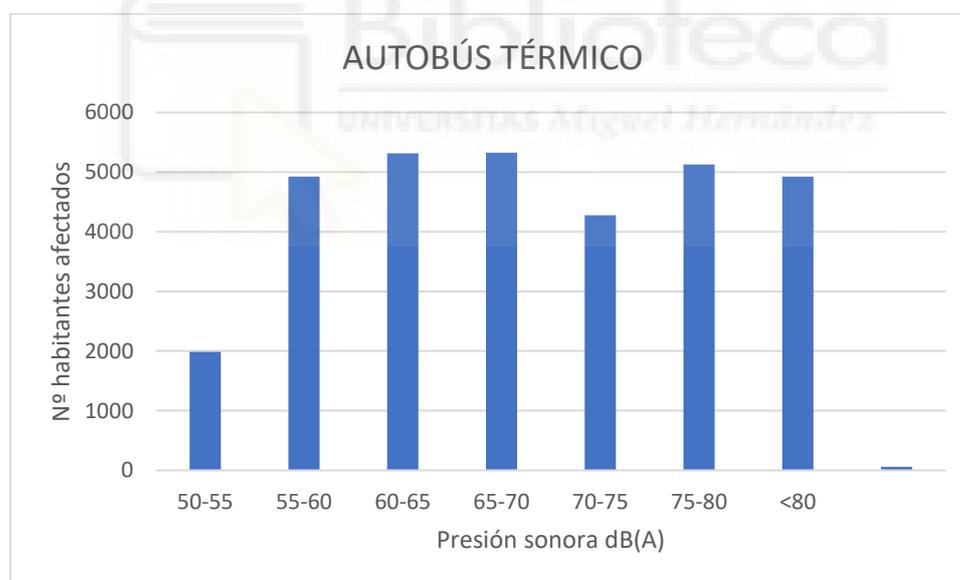


Figura 15: Gráfica habitantes afectados por autobús térmico.

Los datos que se consideran para realizar la gráfica anterior son aquellos en los que el valor de la presión sonora es superior a 50 dB, ya que este valor es el medido como ruido de fondo en un entorno urbano y, por lo tanto, las medidas se consideran inferiores a este valor de ruido de fondo.

Una vez se ha calculado la influencia y repercusión del autobús térmico, se procede a evaluar las consecuencias de la circulación del autobús eléctrico.

Una vez obtenidos los caudales finales de autobuses eléctricos para las distintas velocidades, se introducen dichos valores (velocidad y caudal) en la ruta seguida por el autobús para que el software IMMI calcule las consecuencias de la circulación de autobuses eléctricos y observar las diferencias en los resultados obtenidos para el caso de los autobuses térmicos.

De la misma manera, se puede conseguir una gráfica que relacione el número de habitantes con una franja de ruido correspondiente, pero en este caso, con resultados que reflejan valores de presión sonora debido a la circulación de autobuses eléctricos:

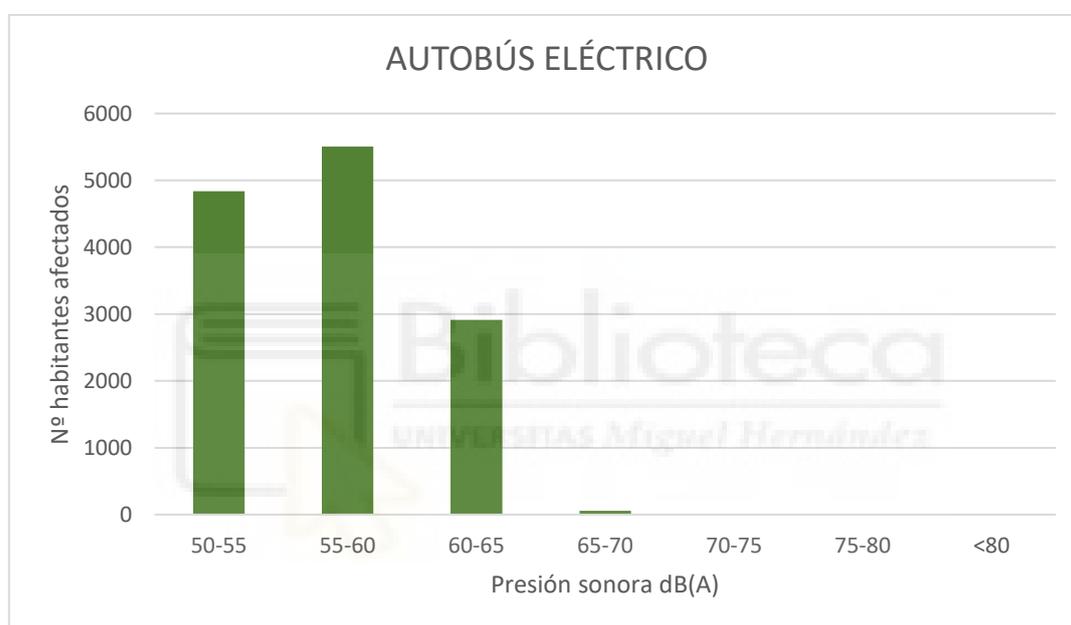


Figura 16: Gráfica habitantes afectados por autobús eléctrico.

De las gráficas anteriores se puede observar cómo, para una misma ruta considerada, los valores de presión sonora son diferentes en función del tipo de propulsión de los vehículos.

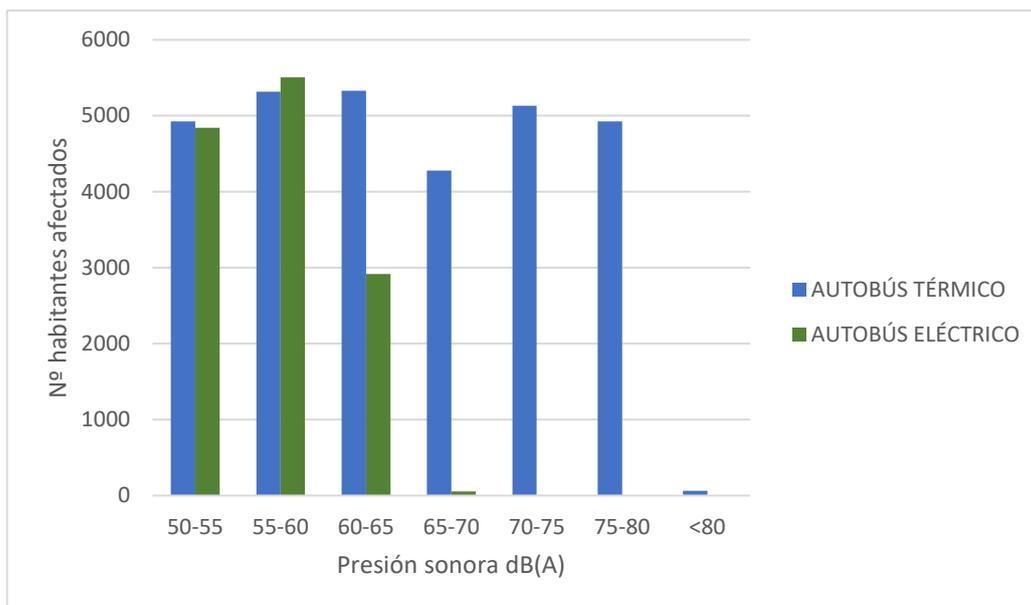


Figura 17: Gráfica comparativa habitantes afectados autobús térmico/eléctrico.

Con el cambio a vehículos eléctricos, se puede ver como desciende el número de ciudadanos afectados por niveles de ruido superiores a lo máximo permitido, a la vez que una mayor cantidad de la población se sitúa en franjas que se consideran dentro de los límites.

Atendiendo a lo que se muestra en la *Figura 15*, se observa que, para el caso del autobús térmico, el número de habitantes que se encuentran en franjas de decibelios aceptables es de aproximadamente 15.000 habitantes, mientras que alrededor de 14.000 habitantes se encuentran expuestos a una presión sonora superior al límite establecido de 65 dB de forma instantánea, lo que supone que aproximadamente un 48% de la población se encuentra ante una situación perjudicial para la salud que puede desembocar en graves problemas.

Sin embargo, para el autobús eléctrico con la misma ruta considerada, se puede observar como todos los habitantes afectados se encuentran por debajo del máximo permitido, consiguiendo así revertir y mejorar la situación que se tiene con el autobús térmico de forma instantánea. Además, hay que destacar la mejora de la situación de aquellos habitantes afectados que ya se encontraban dentro de un rango de presión sonora permitido para el caso del autobús térmico, consiguiendo de esta manera reducir la franja de ruido en la que se hallan.

Por otro lado, vemos como la sustitución de la flota de autobuses térmicos la franja predominante en la que se encuentra la mayoría de los habitantes afectados sea la franja que abarca el rango comprendido entre 55-60 dB, mejorando así la situación del autobús térmico, donde se pueden encontrar diferentes franjas de ruido predominantes, entre ellas la que comprende entre 60-65 dB o 70-75 dB, entre otras.

De las 16 rutas registradas mediante GPS, se muestran 6 a modo de resumen. Estas 6 rutas son las que más relevancia tienen a la hora de estudiar y comparar la situación de los habitantes afectados.

A continuación, se muestra una tabla donde se exponen los resultados de habitantes afectados por franjas, para las diferentes rutas escogidas:

HABITANTES AFECTADOS AUTOBÚS TÉRMICO	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	RUTA 5	RUTA 6
50-55 dB	4048	3274	858	991	5095	4924
55-60 dB	3854	2379	1511	616	4075	5316
60-65 dB	3906	2116	1357	1192	5165	5329
65-70 dB	2966	2097	1043	626	4394	4279
70-75 dB	3825	2851	1632	677	2914	5131
75-80 dB	3119	1105	600	917	2871	4926
<80 dB	160	9	20	0	228	62

*Tabla 13: Habitantes afectados autobús térmico.*

HABITANTES AFECTADOS AUTOBÚS ELÉCTRICO	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	RUTA 5	RUTA 6
50-55 dB	2872	2909	1019	631	4400	4840
55-60 dB	3991	1371	1424	583	3135	5508
60-65 dB	2042	511	553	860	2671	2915
65-70 dB	103	0	65	246	429	56
70-75 dB	0	0	0	0	18	0
75-80 dB	0	0	0	0	0	0
<80 dB	0	0	0	0	0	0

Tabla 14: Habitantes afectados autobús eléctrico.

Con los resultados mostrados en las dos tablas anteriores, se pueden realizar otras en las que queden mostrados el número de habitantes que se encuentran afectados por ruido en niveles permisibles y afectados por ruido en niveles fuera de lo máximo permitido, y comprobar qué cantidad de habitantes mejoran su situación debido a la sustitución del autobús térmico por el autobús eléctrico:

HABITANTES AFECTADOS AUTOBÚS TÉRMICO	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	RUTA 5	RUTA 6
50-65 dB	11808	7769	3726	2799	14335	15569
> 65 dB	10070	6062	3295	2220	10407	14398

Tabla 15: Diferencia habitantes niveles autobús térmico.

HABITANTES AFECTADOS AUTOBÚS ELÉCTRICO	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	RUTA 5	RUTA 6
50-65 dB	8905	4791	2996	2074	10206	13263
> 65 dB	103	0	65	246	447	56

Tabla 16: Diferencia habitantes niveles autobús eléctrico.

En las dos últimas tablas mostradas se encuentra la suma de habitantes afectados para los niveles dentro de lo permitido así como para el total de habitantes afectados por un nivel de ruido que excede del máximo permitido, tanto para el caso del autobús térmico como para el eléctrico en cada una de las rutas estudiadas en profundidad.

Siguiendo estos resultados, se puede comprobar que el descenso de habitantes que se hallan en el rango por encima de los 65 dB es notable para cada una de las rutas, encontrándose todas ellas por debajo del medio millar de personas, mientras que el para el autobús térmico la situación era, como es de esperar, mucho más crítica, ascendiendo hasta 15.500 el número de habitantes afectados.

Cabe destacar, que además, parte de la población que se encontraba en franjas de ruido dentro de lo permitido en el caso del autobús térmico mejorarían su situación con el cambio al eléctrico, lo que haría que estos habitantes se encontrasen en franjas de ruido todavía menores y, por lo tanto, también dentro de lo permitido.



## CONCLUSIONES

### 10. CONCLUSIONES

A lo largo del presente documento, se han analizado los diferentes resultados y consecuencias de la circulación de los autobuses térmicos e híbridos funcionando en modo eléctrico en la ciudad de Elche.

Se ha podido comprobar como la sustitución de la flota de autobuses térmicos por autobuses eléctricos supone una mejora considerable en la calidad de vida de los ciudadanos, consiguiendo de esta manera que todos ellos se encuentren dentro de niveles de ruido permitidos.

Con el cambio a autobuses eléctricos se consiguen mejoras en dos aspectos. En primer lugar, los habitantes afectados que se encontraban en franjas de ruido por encima de 65 dB se encuentran dentro de rangos inferiores y dentro de lo establecido por la ley. En segundo lugar, aquellos habitantes que ya se encontraban dentro de rangos aceptables, mejoran su situación al encontrarse en franjas de ruido inferiores.

Por otro lado, la cantidad mínima de presión sonora percibida por los ciudadanos debe ser de 56 dB (A) [34], dado que los habitantes que se encuentran por debajo de esta franja, se pueden encontrar en una situación perjudicial debido a que es probable que, debido a una baja emisión, los peatones no sean capaces de notificar la presencia de dichos vehículos eléctricos dando lugar a accidentes.

Por lo tanto, se pueden incluir *warnings* en los autobuses de propulsión eléctrica para velocidades que provoquen un nivel de decibelios inferior a 56 dB. Los *warnings* son una serie de sonidos que indican la presencia de vehículos eléctricos para el caso de los turismos. Mediante estos sonidos, se consigue superar los 56 dB en aquellos casos en los que se obtengan valores inferiores a este.

De esta forma, se obtendrían presiones sonoras dentro de los límites inferior y superior (56-65 dB) y por lo tanto se suprimiría el problema de peligro de posibles accidentes a la vez que se mantienen las ventajas de la reducción de ruido de los autobuses eléctricos.

11. ANEJOS

11.1. ANEJO 1

Categoría	Coeficiente	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	Ar	83.4	86.8	86.1	92.5	99.8	96.6	85.8	76.2
	Br	39.2	37.5	32.2	18.4	24.9	25.8	32.1	35.1
	Ap	98.0	90.3	89.7	88.3	86.8	89.7	85.1	78.0
	Bp	2.8	6.1	5.6	5.4	5.1	3.5	5.3	6.3
2	Ar	88.2	91.4	91.0	99.2	100.2	94.3	86.6	82.2
	Br	27.7	23.7	16.6	18.3	28.8	32.6	31.0	28.2
	Ap	105.3	99.4	98.5	99.4	101.5	98.6	91.7	84.6
	Bp	-2.4	-0.6	-1.0	3.8	5.9	5.0	3.3	1.3
3	Ar	90.4	93.2	94.4	104.6	105.3	98.4	89.3	83.8
	Br	30.3	26.9	22.1	26.1	33.7	35.2	35.6	34.0
	Ap	107.8	102.2	102.2	104.9	104.6	100.1	93.5	86.7
	Bp	0.8	0.3	0.3	5.6	6.2	4.4	3.9	2.3
4 a	Ar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Br	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Ap	93.0	93.0	93.5	95.3	97.2	100.4	95.8	90.9
	Bp	4.2	7.4	9.8	11.6	15.7	18.9	20.3	20.6
4 b	Ar	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Br	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Ap	99.9	101.9	96.7	94.4	95.2	94.7	92.1	88.6
	Bp	3.2	5.9	11.9	11.6	11.5	12.6	11.1	12.0
5	Ar	-	-	-	-	-	-	-	-
	Br	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ap	-	-	-	-	-	-	-	-
	Bp	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 17: Coeficientes  $A_{R,i,m}$ ,  $B_{R,i,m}$ ,  $A_{P,i,m}$ ,  $B_{P,i,m}$  según categorías [4].

TRABAJO FINAL DE GRADO, CRISTIAN PÉREZ

Calzada	Vel. (km/h)	Des.	Categ.	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Reference road Surface	-	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
			2	0	0	0	0	0	0	0	0
			3	0	0	0	0	0	0	0	0
			4a/4b	0	0	0	0	0	0	0	0
1-layer ZOAB	50-30	2	1	0	5.4	4.3	4.2	-1	-3.2	-2.6	0.8
			2	7.9	4.3	5.3	-0.4	-5.2	-4.6	-3	-1.4
			3	9.3	5	5.5	-0.4	-5.2	-4.6	-3	-1.4
			4a/4b	0	0	0	0	0	0	0	0
2-layer ZOAB	50-130	3	1	1.6	4	0.3	-3	-4	-6.2	-4.8	-2
			2	7.3	2	-0.3	-5.2	-6.1	-6	-4.4	-3.5
			3	8.3	2.2	-0.4	-5.2	-6.2	-6.1	-4.5	-3.5
			4a/4b	0	0	0	0	0	0	0	0
2-layer ZOAB (fine)	80-130	4	1	-1	3	-1.5	-5.3	-6.3	-8.5	-5.3	-2.4
			2	7.9	0.1	-1.9	-5.9	-6.1	-6.8	-4.9	-3.8
			3	9.4	0.2	-1.9	-5.9	-6.1	-6.7	-4.8	-3.8
			4a/4b	0	0	0	0	0	0	0	0
SMA-NL5	40-80	5	1	10.3	-0.9	0.9	1.8	-1.8	-2.7	-2	-1.3
			2	0	0	0	0	0	0	0	0
			3	0	0	0	0	0	0	0	0
			4a/4b	0	0	0	0	0	0	0	0
SMA-NL8	40-80	6	1	6	0.3	0.3	0	-0.6	-1.2	-0.7	-0.7
			2	0	0	0	0	0	0	0	0
			3	0	0	0	0	0	0	0	0
			4a/4b	0	0	0	0	0	0	0	0
Brushed down concrete	70-120	7	1	8.2	-0.4	2.8	2.7	2.5	0.8	-0.3	-0.1
			2	0.3	4.5	2.5	-0.2	-0.1	-0.5	-0.9	-0.8
			3	0.2	5.3	2.5	-0.2	-0.1	-0.6	-1	-0.9
			4a/4b	0	0	0	0	0	0	0	0
Optimised brushed down concrete	70-80	8	1	-0.2	-0.7	1.4	1.2	1.1	-1.6	-2	-1.8
			2	-0.7	3	-2	-1.4	-1.8	-2.7	-2	-1.9
			3	-0.5	4.2	-1.9	-1.3	-1.7	-2.5	-1.8	-1.8
			4a/4b	0	0	0	0	0	0	0	0
Fine broomed concrete	70-120	9	1	8	-0.7	4.8	2.2	1.2	2.6	1.5	-0.6
			2	0.2	8.6	7.1	3.2	3.6	3.1	0.7	0.1
			3	0.1	9.8	7.4	3.2	3.1	2.4	0.4	0
			4a/4b	0	0	0	0	0	0	0	0
Worked surface	50-130	10	1	8.3	2.3	5.1	4.8	4.1	0.1	-1	-0.8
			2	0.1	6.3	5.8	1.8	-0.6	-2	-1.8	-1.6
			3	0	7.4	6.2	1.8	-0.7	-2.1	-1.9	-1.7
			4a/4b	0	0	0	0	0	0	0	0
Hard elements in herring-bone	30-60	11	1	27	16.2	14.7	6.1	3	-1	1.2	4.5
			2	29.5	20	17.6	8	6.2	-1	3.1	5.2
			3	29.4	21.2	18.2	8.4	5.6	-1	3	5.8
			4a/4b	0	0	0	0	0	0	0	0

Hard elements not in herring-bone	30-60	12	1	31.4	19.7	16.8	8.4	7.2	3.3	7.8	9.1
			2	34	23.6	19.8	10.5	11.7	8.2	12.2	10
			3	33.8	24.7	20.4	10.9	10.9	6.8	12	10.8
			4a/4b	0	0	0	0	0	0	0	0
Quiet hard elements	-	13	1	26.8	13.7	11.9	3.9	-1.8	-5.8	-2.7	0.2
			2	9.2	5.7	4.8	2.3	4.4	5.1	5.4	0.9
			3	9.1	6.6	5.2	2.6	3.9	3.9	5.2	1.1
			4a/4b	0	0	0	0	0	0	0	0
Thin layer A	-	14	1	10.4	0.7	-0.6	-1.2	-3	-4.8	-3.4	-1.4
			2	13.8	5.4	3.9	-0.4	-1.8	-2.1	-0.7	-0.2
			3	14.1	6.1	4.1	-0.4	-1.8	-2.1	-0.7	-0.2
			4a/4b	0	0	0	0	0	0	0	0
Thin layer B	-	15	1	6.8	-1.2	-1.2	-0.3	-4.9	-7	-4.8	-3.2
			2	13.8	5.4	3.9	-0.4	-1.8	-2.1	-0.7	-0.2
			3	14.1	6.1	4.1	-0.4	-1.8	-2.1	-0.7	-0.2
			4a/4b	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 18: Coeficientes  $\alpha$  en bandas de octava para los diferentes tipos de calzadas. [4]



Calzada	Vel. (km/h)	Des.	Categ.	$\beta$
Reference road Surface	-	1	1	0
			2	0
			3	0
			4a/4b	0
1-layer ZOAB	50-30	2	1	6.5
			2	0.2
			3	0.2
			4a/4b	0
2-layer ZOAB	50-130	3	1	3
			2	4.7
			3	4.7
			4a/4b	0
2-layer ZOAB (fine)	80-130	4	1	0.1
			2	0.8
			3	0.9
			4a/4b	0
SMA-NL5	40-80	5	1	1.6
			2	0
			3	0
			4a/4b	0
SMA-NL8	40-80	6	1	1.4
			2	0
			3	0
			4a/4b	0
Brushed down concrete	70-120	7	1	1.4
			2	5
			3	5.5
			4a/4b	0
Optimised brushed down concrete	70-80	8	1	1
			2	6.6
			3	6.6
			4a/4b	0
Fine broomed concrete	70-120	9	1	7.6
			2	3.2
			3	2
			4a/4b	0
Worked surface	50-130	10	1	0.3
			2	1.7
			3	1.4
			4a/4b	0
Hard elements in herring-bone	30-60	11	1	2.5
			2	2.5
			3	2.5
			4a/4b	0

Hard elements not in herring-bone	30-60	12	1	2.9
			2	2.9
			3	2.9
			4a/4b	0
Quiet hard elements	-	13	1	1.7
			2	0
			3	0
			4a/4b	0
Thin layer A	-	14	1	2.9
			2	0.5
			3	0.3
			4a/4b	0
Thin layer B	-	15	1	1.8
			2	0.5
			3	0.3
			4a/4b	0

Tabla 19: Coeficientes  $\beta$  para los diferentes tipos de calzadas. [4]



Referencia	Tipo de Calzada
1	Reference road Surface
2	1-layer ZOAB
3	2-layer ZOAB
4	2-layer ZOAB (fine)
5	SMA-NL5
6	SMA-NL8
7	Brushed down concrete
8	Optimised brushed down concrete
9	Fine broomed concrete
10	Worked surface
11	Hard elements in herring-bone

12	Hard elements not in herring-bone
13	Quiet hard elements
14	Thin layer A
15	Thin layer B

Tabla 20: Tipos de calzadas.

63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0.1	0.4	1	1.9	3.7	9.7	32.8	117
0.1	0.3	1.1	2.8	5	9	22.9	76.6
0.1	0.3	1	3.1	7.4	12.7	23.1	59.3

Tabla 21: Coeficientes  $\alpha_{atm}$  en bandas de octava. [4]

11.2. ANEJO 2

Velocidad del autobús (km/h)	Resultados SONÓMETRO dB(A)
20	69,2
20	70
20	69,9
25	71,2
25	71,3
25	71,3
30	71,6
30	72,1
30	71,5
30	71,4
30	71,6
20	69,4
25	73,6
25	72,5
30	76,8
25	73,4
25	71,8
25	73,5
15	76,2
15	73,9
15	73,7
20	75,4
30	76,7
25	72,6

Tabla 22: Medidas sonómetro autobús térmico.

Velocidad del autobús (km/h)	Resultados SONÓMETRO dB(A)
25	65,1
25	65,2
25	65,6
20	62,1
25	68,9
25	67,3
25	66,2
25	68,6
25	65,3
25	69,0
25	65,6
25	68,3
25	65,7
25	67,7
25	69,6

Tabla 23: Medidas sonómetro autobús eléctrico.



## 12. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental.
- [2] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. GUÍA BÁSICA DE RECOMENDACIONES PARA LA APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS COMUNES DE EVALUACIÓN DEL RUIDO EN EUROPA (CNOSSOS-EU), noviembre 2021.
- [3] Vidal-Sánchez, A. G; Velasco-Sánchez, E; Peral-Orts, R; Campillo-Davó, N; Campello- Vicente, H. Estudio comparativo de diferentes metodologías para la confección de mapas acústicos. V Congreso Iberoamericano de Acústica. Coimbra 2008 (Portugal)
- [4] Stylianos Kephelopoulos, Marco Paviotti, Fabienne Anfosso-Lédée. Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU), 2012.
- [5] <https://elx2030.es/agenda-2030/>
- [6] <https://www.elche.es/2022/05/el-pleno-saca-adelante-el-plan-de-movilidad-sostenible-de-elche-que-preve-reducir-en-un-50-las-emisiones-contaminantes-para-2030/>
- [7] Nelson, P. Transportation Noise Reference Book. Butterworths-Heinemann .1987. London.
- [8] Gilbert, D. Noise from Road Traffic (Interrupted Flow). Journal of Sound and Vibration 51. pp 171-181. 1977.
- [9] Favre, B. Noise emission of road vehicles: evaluation of some simple models. Journal of Sound and Vibration Cap 10. 1983.
- [10] Kragh, J.; Plowsing, B.; Storeheier, S.; Taraldsen, G.; Jonasson, H.; Saarinen, A. Nord2000, Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. 2006.
- [11] Federal Highway Traffic Noise Prediction Model FHWA-RD-77-108. Federal Highway Administration. U.S Department of transportation 1979.

- [12] Jraiw, K. S. Applied Acoustics 21. A Computer Model to Assess and Predict Road Transport Noise in Built-up Areas. 147-162. 1987.
- [13] Radwan, M.M.; Oldham D.J. The Prediction of Noise from Urban Traffic Under Interrupted Flow Conditions. Applied Acoustics 21 1987.
- [14] Cammarata, G.; Cavalieri, S.; Fichera A. A Neural Network Architecture for Noise Prediction. Neural Networks, Vol. 8 No6. 963-973. 1995
- [15] Miyara, F. Modelización del ruido de tránsito automotor, modelos físicos determinísticos y estadísticos. Curso Universidad Austral de Chile. Valdivia. 1999.
- [16] OFPE. Modèle de calcul de bruit du trafic routier pour ordinateur. Les cahiers de l'environnement. Berne: Office Fédéral de la Protection de l'Environnement; 1987.
- [17] Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen, Ausgabe. Bundesminister für Verkehr, Deutschland. 1990.
- [18] Department of Transport. Calculation of road traffic noise. Department of Transport, Welsh Office, HMSO.U.K.: Department of Transport, Welsh Office, HMSO. 1998
- [19] Road Noise Prediction 1 - Calculating sound emissions from road traffic Sétra. Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements june 2009
- [20] Road Noise Prediction 2 - Noise propagation computation method including meteorological effects (NMPB 2008). Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements june 2009
- [21] JRC, IHCP, Common Noise Assessment Methods in EU (CNOSSOS-EU), Draft JRC Reference Report (2010) 1-131.
- [22] Política futura de lucha contra el ruido. Libro Verde de la Comisión Europea. ES/11/96/03030100.P00. Bruselas, 1996.
- [23] Stylianos Kephelopoulos, Marco Paviotti, Fabienne Anfosso-Lédée, Dirk Van Maercke Simón Shilton, Nigel Jones. Avances en el desarrollo de métodos

comunes de evaluación del ruido en Europa: El marco CNOSSOS-UE para la cartografía estratégica del ruido ambiental, Febrero 2014

[24] Salomons, Erik; van Maercke, Dirk; Defrance, Jérôme; de Roo, Foort (2011). The Harmonoise Sound Propagation Model. Acta Acustica united with Acustica, Enero 2011, doi: 10.3813/AAA.918387

[25] IMAGINE CONSORTIUM, Imagine project, (2008).

[26] A. Kok, A. van Beek. Enmiendas para CNOSSOS-UE, Descripción de problemas y soluciones propuestas, 2019.

[27] ISO 9613-2: 1996 Acoustics-Attenuation of sound during propagation outdoors. Genève, Suiza. 1993..

[28] Estellés Díaz, Ricardo, Fernández Rodeiro, Alejandro, FUENTES SONORAS Y PROPAGACIÓN DEL SONIDO, 2007.

[29] <https://www.immi.eu/es/aplicaciones.html>

[30] Campello Vicente, Héctor. Adaptación del modelo de predicción de ruido de tráfico rodado NMPB-ROUTES 2008 a la presencia de vehículos eléctricos, 2014

[31] Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure. European Commission Working Group. Assessment of Exposure to Noise (WG-AEN). Position Papers. Version 2. 13th Jan. 2006.

[32] Vorläufige Berechnungsmethode zur Ermittlung der Belastetenzahlen durch Umgebungslärm (VBEB): Preliminary calculation method for determining the exposure figures caused by environmental noise. Federal German Gazette of 20th April 2007; p.4, 2007.

[33] DECRETO 141/2012, de 30 de octubre, por el que se regulan las condiciones mínimas de habitabilidad de las viviendas y la cédula de habitabilidad.

[34] <https://www.michelin.es/auto/consejos/guia-movilidad-electrica/ruido-de-los-coches-electricos-son-mas-silenciosos>

