

PROYECTO FIN DE GRADO

TÍTULO: CONTAMINACIÓN ACÚSTICA Y AVAS (SISTEMA DE ALERTA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS)

AUTOR/A: RICARDO MORENO BARRAJÓN

TITULACIÓN: GRADO EN INGENIERÍA DE SONIDO E IMAGEN

TUTOR/A: CÉSAR ASENSIO RIVERA

DEPARTAMENTO: INGENIERÍA AUDIOVISUAL Y COMUNICACIONES

VºBº TUTOR/A

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE/A: BOZENA WISLOCKA BREIT

TUTOR/A: CÉSAR ASENSIO RIVERA

SECRETARIO/A: EDUARDO LATORRE IGLESIAS

Fecha de lectura: 26/09/2024

Calificación:

El Secretario/La Secretaria,

Resumen

El avance de la tecnología ha llevado al desarrollo de vehículos eléctricos que, aunque presentan numerosas ventajas ambientales, plantean nuevos desafíos en términos de seguridad vial. A bajas velocidades, los coches eléctricos son significativamente más silenciosos que los vehículos de combustión interna. Aunque este silencio es positivo desde el punto de vista de la contaminación acústica, presenta un peligro potencial para los peatones, especialmente personas con problemas de discapacidad visual y auditiva, así como para otros usuarios de la vía. Para mitigar este riesgo se ha implementado el sistema AVAS (*Acoustic Vehicle Alerting System*), un mecanismo que emite sonidos artificiales cuando el vehículo eléctrico circula a velocidades inferiores a 20 kilómetros por hora, advirtiendo así a los peatones de su proximidad.

Desde la perspectiva de la contaminación acústica, el uso del sistema AVAS introduce una fuente sonora adicional en entornos urbanos. El objetivo principal es encontrar un equilibrio entre la necesidad de alertar a los peatones y ciclistas, entre otros, y la minimización del ruido ambiental.

Para ello, se realizaron pruebas con diferentes tipos de vehículos, dos de combustión interna y uno eléctrico, y se emplearon un par de métodos (Pass-By y Stop&Go), para medir el nivel de presión sonora y ver cómo podría afectar el sistema AVAS a la contaminación acústica en comparación al ruido que generan los vehículos de combustión interna. Además, se llevaron a cabo varios modelos de simulación para prever el comportamiento acústico en distintas situaciones de tráfico y configuraciones urbanas, desde escenarios con solo vehículos eléctricos con el sistema AVAS activado y desactivado, hasta escenarios en los que los vehículos eléctricos se introducen progresivamente mientras disminuyen los vehículos de combustión, con el fin de evaluar los beneficios potenciales de esta reducción de ruido.

Los resultados muestran que, aunque el sistema AVAS incrementa ligeramente los niveles de ruido en comparación con un vehículo eléctrico sin este sistema, la contribución global al ruido urbano es mínima. Asimismo, se concluyó que el AVAS proporciona una mejora significativa en la seguridad vial sin comprometer de forma grave en la calidad del ambiente sonoro urbano. En términos generales, el uso obligatorio del AVAS es una solución viable y efectiva para abordar el problema de la seguridad en vehículos eléctricos, balanceando adecuadamente las necesidades de seguridad y de control de la contaminación acústica.

Abstract

The advancement of technology has led to the development of electric vehicles which, although it offers numerous environmental advantages, pose new challenges in terms of road safety. At low speeds, electric cars are significantly quieter than internal combustion vehicles. Although this silence is positive from the point of view of noise pollution, it presents a potential danger to pedestrians, especially those with visual and hearing impairments, as well as to other road users. To mitigate this risk, the AVAS (Acoustic Vehicle Alerting System) has been implemented, a mechanism that emits artificial sounds when the electric vehicle is traveling at speeds below 20 kilometers per hour, thereby warning pedestrians of its proximity.

From a noise pollution perspective, the use of the AVAS introduces an additional noise source in urban environments. The main objective is to find a balance between the need to alert pedestrian and cyclists, among others, and the minimization of environmental noise.

For this purpose, tests were carried out with different types of vehicles, two internal combustion vehicles and one electric vehicle, and a couple of methods (Pass-By and Stop&Go) were used to measure the sound pressure level and assess how the AVAS system could affect noise pollution compared to the noise generated by internal combustion vehicles. In addition, several simulation models were carried out to predict the acoustic behaviour in different traffic situations and urban configurations, from scenarios with only electric vehicles with the AVAS system activated and deactivated, to scenarios where electric vehicles are progressively introduced as combustion vehicles decrease, in order to evaluate the potential benefits of this noise reduction.

The results show that, although the AVAS slightly increases noise levels compared to an electric vehicle without this system, the overall contribution to urban noise is minimal. It was also concluded that AVAS provides a significant improvement in road safety without seriously compromising the quality of the urban noise environment. Overall, the mandatory use of AVAS is a viable and effective solution to address the problem of electric vehicle safety, appropriately balancing the needs of safety and noise pollution control.

Índice de figuras

Figura 1. Representación del sistema acústico de advertencia instalado en el modelo Toyota Prius [7].	15
Figura 2. Localización de la fuente puntual en vehículos ligeros, vehículos pesados y vehículos de dos ruedas.	18
Figura 3. Diagrama de bloques para la comparativa de niveles de presión sonora entre los vehículos de combustión y el vehículo eléctrico.	26
Figura 4. Diagrama de bloques para el proceso de evaluación de la exposición al ruido en escenarios urbanos.	27
Figura 5. Ilustración del vehículo eléctrico Opel Mokka-e utilizado [16].	29
Figura 6. Ilustración del vehículo de gasolina Opel Grandland X utilizado.	29
Figura 7. Ilustración del vehículo de diésel Citroën Picasso utilizado.	30
Figura 8. Representación del método de ensayo denominado Pass-By.	31
Figura 9. Representación del método de ensayo denominado Stop&Go.	32
Figura 10. Niveles de presión sonora en dBA con respecto a la velocidad alcanzada en km/h para un vehículo eléctrico.	34
Figura 11. Niveles de presión sonora alcanzados a velocidades mayores de 20 km/h.	34
Figura 12. Niveles de presión sonora para los vehículos eléctricos sin AVAS activado a las velocidades de 10 y 20 km/h.	35
Figura 13. Diferencia de nivel de presión sonora a la velocidad de 20 km/h para vehículos con el AVAS activado y sin activar.	36
Figura 14. Representación del número de plantas sobre rasante de la calle Princesa según el informe generado por esDiario.es [32].	39
Figura 15. Representación del número de plantas sobre rasante de la calle Princesa visualizado desde la sede del catastro [33].	40
Figura 16. Altura incorporada para cada uno de los edificios tras conocer su número de plantas en ArcMap.	40
Figura 17. Visualización desde la sede del catastro [33] de los distintos bloques de los edificios característicos de la calle Princesa de Madrid.	41
Figura 18. Plantilla Excel utilizada para el conteo de residencias de los edificios expuestos en la calle Princesa.	41
Figura 19. Representación gráfica del nivel de presión sonora ejercida por el vehículo eléctrico en función de la frecuencia mediante el método Pass-By.	44
Figura 20. Representación gráfica del nivel de presión sonora ejercida por el vehículo de gasolina en función de la frecuencia mediante el método Pass-By.	45

Figura 21. Representación del nivel de presión sonora en función de la velocidad para el vehículo de gasolina.....	46
Figura 22. Representación gráfica del nivel de presión sonora ejercida por el vehículo de diésel en función de la frecuencia mediante el método Pass-By.	47
Figura 23. Representación del nivel de presión sonora en función de la velocidad para el vehículo de diésel.....	47
Figura 24. Comparación de la representación gráfica del nivel de presión sonora para los 3 tipos de vehículos en función de la frecuencia mediante el método Pass-By a 10 km/h.48	
Figura 25. Comparación del nivel de presión sonora total (SPL) entre vehículos de combustión interna (VCI) y vehículos eléctricos (VE) a distintas velocidades.....	48
Figura 26. Representación gráfica del nivel de presión sonora en función que ejerce el vehículo eléctrico en función de la frecuencia mediante el método Stop&Go.....	50
Figura 27. Representación gráfica del nivel de presión sonora en función que ejerce el vehículo de gasolina en función de la frecuencia mediante el método Stop&Go.	51
Figura 28. Representación gráfica del nivel de presión sonora en función que ejerce el vehículo de gasolina en función de la frecuencia mediante el método Stop&Go.	51
Figura 29. Comparación del nivel de presión sonora entre vehículos de combustión interna (VCI) y vehículos eléctricos (VE) en función de la frecuencia y mediante el método Stop&Go.	52
Figura 30. Gráfica resultante de la influencia de los vehículos eléctricos con respecto al nivel de presión sonora máximo ejercido a los ciudadanos.....	62
Figura 31. Gráfica resultante de la influencia de los vehículos eléctricos con AVAS o sin AVAS por separado con respecto al nivel de presión sonora máximo ejercido a los ciudadanos.	62
Figura 32. Gráfica que muestra el porcentaje de personas expuestas al ruido en función de la presencia de VE con AVAS y sin AVAS activado.	63
Figura 33. Representación del escenario CASO 1: toda la capa de edificios que rodean a la calle Princesa.....	81
Figura 34. Representación los escenarios: edificios más expuestos a la calle Princesa.	82
Figura 35. Representación del método “Evaluación en edificios” en CadnaA para todos los escenarios.	83
Figura 36. Ejemplo de evaluación de uno de los edificios del escenario del CASO 1.	84

Índice de tablas

Tabla 1. Número total de residentes por cada uno de los edificios.	42
Tabla 2. Nivel de presión sonora ejercida por el vehículo eléctrico en función de la velocidad mediante el método Pass-By.	45
Tabla 3. Nivel de presión sonora ejercida por el vehículo de gasolina en función de la velocidad mediante el método Pass-By.	45
Tabla 4. Nivel de presión sonora ejercida por el vehículo de diésel en función de la velocidad mediante el método Pass-By.	47
Tabla 5. Nivel de potencia sonora total del escenario 7.1 caso 1.	54
Tabla 6. Reparto de personas para cada grupo de nivel captado por los receptores de fachada. Escenario 7.1 caso 1.	55
Tabla 7. Porcentaje de exposición al ruido para cada uno de los niveles. Escenario 7.1 caso 1.	55
Tabla 8. Nivel de potencia sonora total del escenario 7.1 caso 2.	55
Tabla 9. Reparto de personas para cada grupo de nivel captado por los receptores de fachada. Escenario 7.1 caso 2.	55
Tabla 10. Porcentaje de exposición al ruido para cada uno de los niveles. Escenario 7.1 caso 2.	56
Tabla 11. Nivel de potencia sonora total del escenario 7.1 caso 3.	56
Tabla 12. Reparto de personas para cada grupo de nivel captado por los receptores de fachada. Escenario 7.1 caso 3.	56
Tabla 13. Porcentaje de exposición al ruido para cada uno de los niveles. Escenario 7.1 caso 3.	56
Tabla 14. Nivel de potencia sonora total del escenario 7.2 caso 1.	58
Tabla 15. Reparto de personas para cada grupo de nivel captado por los receptores de fachada. Escenario 7.2 caso 1.	58
Tabla 16. Porcentaje de exposición al ruido para cada uno de los niveles. Escenario 7.2 caso 1.	58
Tabla 17. Nivel de potencia sonora total del escenario 7.2 caso 2.	58
Tabla 18. Reparto de personas para cada grupo de nivel captado por los receptores de fachada. Escenario 7.2 caso 2.	59
Tabla 19. Porcentaje de exposición al ruido para cada uno de los niveles. Escenario 7.2 caso 2.	59
Tabla 20. Nivel de potencia sonora total del escenario 7.2 caso 3.	59
Tabla 21. Reparto de personas para cada grupo de nivel captado por los receptores de fachada. Escenario 7.2 caso 3.	60
Tabla 22. Porcentaje de exposición al ruido para cada uno de los niveles. Escenario 7.2 caso 3.	60
Tabla 23. Nivel de potencia sonora total del escenario 7.2 caso 4.	60
Tabla 24. Reparto de personas para cada grupo de nivel captado por los receptores de fachada. Escenario 7.2 caso 4.	61
Tabla 25. Porcentaje de exposición al ruido para cada uno de los niveles. Escenario 7.2 caso 4.	61
Tabla 26. Nivel de potencia sonora total del escenario 7.2 caso eléctricos.	64
Tabla 27. Reparto de personas para cada grupo de nivel captado por los receptores de fachada. Escenario 7.2 caso eléctricos.	64
Tabla 28. Porcentaje de exposición al ruido para cada uno de los niveles. Escenario 7.2 caso eléctricos.	64
Tabla 29. Nivel de potencia sonora total del escenario 7.2 caso baja velocidad.	65

Tabla 30. Reparto de personas para cada grupo de nivel captado por los receptores de fachada. Escenario 7.2 caso baja velocidad.....	65
Tabla 31. Porcentaje de exposición al ruido para cada uno de los niveles. Escenario 7.2 caso baja velocidad.....	65
Tabla 32. Tablas de objetivos de calidad acústica para ruido para áreas urbanizadas existentes.....	67
Tabla 33. Coeficientes para los vehículos $m = 1$ (vehículos ligeros).....	73
Tabla 34. Coeficientes para los vehículos $m = 3$ (vehículos pesados).....	73
Tabla 35. Coeficientes para los vehículos $m = 4b$ (motocicletas).....	74
Tabla 36. Nivel de presión sonora medio (SPL) ejercida por el vehículo eléctrico en función de la frecuencia medido mediante el método Pass-By.....	75
Tabla 37. Nivel de presión sonora (SPL) ejercido por el vehículo eléctrico en función de la frecuencia medido mediante el método Stop&Go.....	76
Tabla 38. Nivel de presión sonora media ejercida por el vehículo de gasolina en función de la frecuencia medido mediante el método Pass-By.....	77
Tabla 39. Nivel de presión sonora ejercido por el vehículo de gasolina en función de la frecuencia medido mediante el método Stop&Go.....	78
Tabla 40. Nivel de presión sonora ejercida por el vehículo de diésel en función de la frecuencia medido mediante el método Pass-By.....	79
Tabla 41. Nivel de presión sonora ejercido por el vehículo de diésel en función de la frecuencia medido mediante el método Stop&Go.....	80
Tabla 42. Número total de personas por micrófono.....	85
Tabla 43. Número de personas por micrófono y por nivel para cada edificio del Escenario 7.1 CASO 1.....	87
Tabla 44. Número de personas por micrófono y por nivel para cada edificio del Escenario 7.1 CASO 2.....	88
Tabla 45. Número de personas por micrófono y por nivel para cada edificio del Escenario 7.1 CASO 3.....	89
Tabla 46. Número de personas por micrófono y por nivel para cada edificio del Escenario 7.2 CASO 1.....	91
Tabla 47. Número de personas por micrófono y por nivel para cada edificio del Escenario 7.2 CASO 2.....	92
Tabla 48. Número de personas por micrófono y por nivel para cada edificio del Escenario 7.2 CASO 3.....	93
Tabla 49. Número de personas por micrófono y por nivel para cada edificio del Escenario 7.2 CASO 4.....	94
Tabla 50. Número de personas por micrófono y por nivel para cada edificio del Escenario 7.2 CASO ELÉCTRICOS.....	95
Tabla 51. Número de personas por micrófono y por nivel para cada edificio del Escenario 7.2 BAJA VELOCIDAD.....	96

Índice de contenidos

Resumen	1
Abstract	3
Índice de figuras	5
Índice de tablas	7
1. Introducción	11
2. Antecedentes	13
2.1. Ventajas y desventajas del vehículo eléctrico	13
2.2. Explicación y origen del AVAS.....	15
2.3. Definiciones generales - método CNOSSOS-EU.....	17
2.4. Software utilizado	23
2.4.1. ArcGis Desktop	23
2.4.2. CadnaA (<i>Computer Aided Noise Abatement</i>)	23
3. Objetivos.....	24
4. Especificaciones y restricciones de diseño	25
5. Metodología.....	28
5.1. Datos de entrada para la evaluación de la influencia del sistema AVAS	28
5.1.1. Pista de ensayo y vehículos utilizados en la toma de datos	28
5.1.2. Método Pass-By	31
5.1.3. Método Stop&Go	32
5.2. Datos de entrada para la simulación de escenarios	33
5.2.1. Cálculo del nivel de potencia de los vehículos eléctricos	33
5.2.2. Ajuste de niveles de presión sonora para los vehículos eléctricos sin el AVAS activado	34
5.2.3. Propuesta de escenarios	37
5.2.4. Cálculo de las alturas de los edificios	39
5.2.5. Cálculo de los residentes para cada uno de los edificios	41
5.2.6. Asignación de residentes por micrófono	43
6. Resultados de la evaluación de la influencia del AVAS.....	44
6.1. Resultados Pass-By	44
6.2. Resultados Stop&Go	50
6.3. Conclusiones	53
7. Resultados simulaciones de los diferentes escenarios y exposición al ruido..	54
7.1. Escenario de únicamente vehículos eléctricos	54
7.2. Escenarios de vehículos eléctricos y de combustión a velocidad constante.	58
Conclusión.....	67
Referencias	69
Anexo	73
A.1 Tablas de coeficientes para la potencia acústica de los vehículos de carretera	73
A.2 Resultados de la medición de vehículos en función de la frecuencia	75

A.3	Cálculo de las personas expuestas al ruido.....	81
A.4	Tablas de resultados para las personas expuestas al ruido	86
A.4.1.	Escenarios de solamente vehículos eléctricos.....	86
A.4.2.	Escenarios de vehículos eléctricos y de combustión a velocidad constante	90

1. Introducción

Se define el ruido ambiental como el sonido exterior no deseado o nocivo generado por las actividades humanas, incluido el ruido emitido por los medios de transporte, el tráfico rodado, ferroviario, aéreo y por emplazamientos de actividades industriales [1].

Cuando este ruido se intensifica y se vuelve constante en el tiempo se convierte en una fuente de contaminación acústica.

Son varias las causas por las que hablamos de contaminación acústica: tráfico automovilístico, tráfico aéreo, obras incesantes de construcción, restauración y el ocio nocturno. Éstas nos pueden llevar a través de un ruido constante y excesivo a problemas de salud, más allá de los efectos negativos lógicos sobre la audición (tinnitus y sordera), se presentan los siguientes:

- **Psicopatológicos:** produce una agitación respiratoria, aceleración del pulso, aumento de la presión arterial, dolor de cabeza. Si la exposición al ruido es extrema y constante produce gastritis, colitis o incluso infartos.
- **Psicológicos:** dependen de cada individuo y provocan alteraciones en la conducta y el bienestar. Pueden provocar episodios de fatiga, estrés, depresión, ansiedad o irritabilidad tanto en seres humanos como en animales.
- **De sueño y conducta:** si se encuentra expuesto a una exposición por encima de los 45 dB es difícil conciliar el sueño o descansar plácidamente, lo recomendable es no exceder los 30 dB. Esto afecta a la conducta de las personas y puede provocar episodios de irritabilidad o agresividad.
- **De memoria y atención:** influye en el rendimiento y en la capacidad de concentración.
- **Fisiológicos:** puede afectar al sistema cardiovascular, sistema endocrino, sistema respiratorio, puede incluso alterar el equilibrio, la visión... Todo esto depende de los niveles y el tiempo en los que los individuos están expuestos al ruido [2].

Del mismo modo, las normativas y regulaciones son herramientas importantes que ayudan a limitar los niveles de ruido en diferentes áreas. Muchas de las que se han propuesto o ya se han establecido consisten en lo siguiente:

- Limitar el ruido en áreas residenciales, comerciales e industriales.
- Reducir el ruido generado en la noche para promover un mejor descanso.
- Llevar a cabo inspecciones regulares para garantizar el cumplimiento de las normativas y aplicar sanciones a los que no cumplan lo establecido [4].

El avance de la tecnología nos da la oportunidad de reducir este tipo de contaminación, apostando por tecnologías más silenciosas. A diferencia de los vehículos de combustión interna, los vehículos eléctricos exponen menor ruido especialmente a bajas velocidades, lo cual puede conllevar a un peligro para su detección por parte de los peatones y ciclistas, aumentando el riesgo de accidentes. Además, la alta aceleración de estos tipos de vehículos puede sorprender también a otros conductores, generando situaciones peligrosas en la vía.

De esta problemática surge la implementación del AVAS (*Acoustic Vehicle Alerting System*), diseñado para generar sonidos que imiten los ruidos típicos de un motor de combustión interna y que, de esta forma, cuando estén en movimiento sean fácilmente reconocibles para los peatones, ciclistas y demás vehículos [3].

Aunque el AVAS introduce un nuevo tipo de sonido en el entorno, está diseñado cuidadosamente para evitar la contaminación acústica excesiva. El ruido emitido debe ser menor, y, por tanto, menos perjudicial que el de los motores de combustión.

2. Antecedentes

2.1. Ventajas y desventajas del vehículo eléctrico

El porcentaje de ventas de vehículos eléctricos aumenta a nivel mundial y los fabricantes ofrecen cada vez más opciones a los consumidores. Los precios del combustible continúan incrementando y el paso a la energía eléctrica va tomando fuerza debido a las regulaciones gubernamentales y los objetivos de reducción de emisiones.

Mientras que muchos de los fabricantes de automóviles avanzan con la tecnología para ampliar más opciones eléctricas e híbridas en sus gamas, también se busca un aumento general de transporte electrificado como es el caso de autobuses, camiones y ferries entre otros [9].

La Unión Europea (UE) ha manifestado su firme propósito de transformar una economía más sostenible y con bajas emisiones de carbono [10]. La descarbonización del sistema de transportes ocupa un lugar central dentro de estas iniciativas.

El transporte es un componente esencial para cualquier sociedad sólida: conecta personas, sustenta el comercio y fomenta el crecimiento, por el contrario, supone una importante carga para el medioambiente. En Europa, implica una cuarta parte de las emisiones de gases de efecto invernadero lo que perjudica al **Pacto Verde Europeo** que propone la UE [11].

Con el Pacto Verde Europeo lo que propone la Comisión Europea es un conjunto de propuestas para adaptar las políticas de la UE sobre clima, energía, transporte y fiscalidad con el objetivo de reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero al menos un 55% de aquí a 2030, en comparación a los niveles obtenidos en 1990. En el caso del transporte, se prepara que todos los nuevos vehículos matriculados en Europa para turismos y furgonetas sean de emisión cero. La propia UE colabora en la creación de nuevas infraestructuras para la recarga de estos vehículos de emisión cero en forma de parques de capacidad pública para la recarga eléctrica, además de un mayor suministro de cargadores privados en casa o en el trabajo.

También se prevé que a partir de 2027 el transporte por carretera esté sujeto al comercio de derechos de emisión, lo que fijará el precio a la contaminación y fomentará el uso de combustibles limpios y la reinversión en tecnologías limpias [12].

Entonces, ¿cuáles son las ventajas y los inconvenientes de estos tipos de vehículos?

Muchos de los beneficios que supone utilizar vehículos eléctricos son los siguientes:

- Emiten menos contaminantes a la atmósfera, ya que reducen las emisiones considerablemente. Este es uno de los principales factores por los que se incrementa su uso en las ciudades, que es donde suele haber más problemas con las emisiones de gases contaminantes [13].

- Manejar este tipo de vehículos conlleva grandes ventajas fiscales, como la ayuda de compra, la rebaja de precios en zonas de estacionamiento, parkings y peajes o incluso la exención del pago de impuesto de circulación.
- El mantenimiento general del vehículo decrece dado que cuenta con pocas piezas mecánicas móviles y es menos susceptible a sufrir averías.
- Menor coste de consumo.
- Cuenta con la habilidad del frenado regenerativo, que recupera la energía cinética perdida en forma de calor durante el frenado y la convierte nuevamente en energía eléctrica para cargar la batería [9].
- El motor eléctrico tiene una mayor eficiencia con respecto a los vehículos de combustión interna, situándose alrededor del 90%, mientras que por limitaciones termodinámicas el motor diésel se situaría alrededor de un 40%, siendo superior a la eficiencia de un motor de gasolina [14].
- Además, el motor eléctrico ocupa menos espacio y es más versátil, lo cual supone un espacio mejor distribuido y aprovechado, adquiriendo mayor comodidad y confort [15].
- El ruido que generan al no contar con la combustión del motor es positivo para la contaminación ambiental a bajas velocidades.

En cuanto a las desventajas que nos ofrecen estos vehículos podemos destacar las siguientes:

- La autonomía, el tener que recargar las baterías tras unos 100 o 120 kilómetros de viaje aproximadamente limita de forma significativa a los usuarios. Esta clara desventaja es en la que se centran los fabricantes para desarrollar nuevos modelos con una mayor autonomía [14].
- El tiempo de repostaje, ya que se necesitan horas para una carga completa.
- La fecha de caducidad de las baterías eléctricas.
- La necesidad de carga de los coches eléctricos es desfavorable con los recursos naturales al hacer que exista más demanda proveniente de microgeneradores o centrales eléctricas, lo que lleva a una mayor generación y un mayor consumo de éstos.
- Menor potencia en la conducción, debido a que estos medios de transporte no alcanzan las mismas velocidades punta que los vehículos de combustión interna [13].
- Al ser más silenciosos a bajas velocidades, provocan un mayor riesgo de atropello a peatones y ciclistas, y, de accidentes con otros vehículos.
- La uniformidad de los sonidos AVAS entre diferentes vehículos pueden llevar a una falta de variabilidad acústica en el entorno urbano, lo que puede hacer que los conductores y peatones se acostumbren al ruido y presten menos atención con el tiempo.

2.2. Explicación y origen del AVAS

El sistema AVAS (Acoustic Vehicle Alerting System o Sistema de Alerta Acústica de Vehículos) aparece a manos de la Unión Europea que tras el Reglamento Delegado (UE) 2017/1576 [5] obliga a todos los vehículos eléctricos e híbridos de nueva homologación incorporar dicho sistema de seguridad a partir de julio de 2019. Además, el pasado julio de 2021 se aprobaba la obligatoriedad de convertir este dispositivo indispensable para todos los coches con motor eléctrico.

Este sistema se instala en la parte delantera del vehículo, como puede verse en la Figura 1, ya que es la dirección principal de movimiento y el sonido debe ser percibido de forma clara en el exterior.



Figura 1. Representación del sistema acústico de advertencia instalado en el modelo Toyota Prius [7].

El objetivo principal de este dispositivo es alertar del peligro a los ciudadanos, peatones y ciclistas que pueden no percatarse de la presencia de coches eléctricos a baja velocidad y ahorrarse de esta manera accidentes que pueden llegar a ser potencialmente peligrosos. Según un estudio elaborado por la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las Carreteras de Estados Unidos (NHTSA) los vehículos eléctricos presentan un 35% más de posibilidades de atropellar a peatones con respecto a los vehículos de combustión interna. La cifra aumenta todavía más en el caso de accidentes con ciclistas [6].

En cuanto a especificaciones técnicas, el dispositivo debe emitir un sonido de entre 56 dB y 75 dB desde que el vehículo está inmóvil hasta que alcanza una velocidad superior o igual a 20 km/h. Igualmente cuando éste circule marcha atrás, el avisador debe indicar que el vehículo esté haciendo este movimiento. Este límite de 20 km/h se debe a que a una velocidad superior no haría sonar ningún pitido dado que el ruido de la banda de rodadura de los coches es percibido de manera instantánea. El estudio ha sido desarrollado por la Comisión Europea y la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (UNECE) [6].

Por ello, debe proporcionar cierta información acerca del comportamiento del coche, tal y como se comporta un vehículo con un motor de combustión, es decir, el peatón o ciclista debe asimilar con el comportamiento del sistema que está acelerando o decelerando. Dependiendo del vehículo, el sistema AVAS que tiene incorporado puede disponer de un sistema de pausa

que puede usar el conductor al considerar que no es necesario en ese preciso momento, dejando finalmente el sistema en posición de activado para que vuelva a realizar su función.

Por otro lado, este sistema se enfrenta aún a varios desafíos, como puede ser que diferentes países entre los que están Japón y Estados Unidos que establecen sus propios límites de ruido, lo que conlleva a un problema si se quiere utilizar un vehículo eléctrico desarrollado fuera de nuestras fronteras. También a que se utilizan diferentes sonidos dependiendo del fabricante o modelo, pero en definitiva está demostrado que es un elemento de seguridad indispensable para los vehículos eléctricos [8].

2.3. Definiciones generales - método CNOSSOS-EU

A continuación, este estudio seguirá las indicaciones establecidas en la norma CNOSSOS-EU (*Common Noise Assessment Methods in Europe*). Esta normativa proporciona una metodología unificada y estandarizada para la evaluación del ruido ambiental en toda la Unión Europea [18]. La aplicación de estas directrices permitirá realizar un análisis preciso del impacto acústico en el área de estudio, abordando aspectos clave como la emisión y la propagación del ruido en entornos urbanos. A partir de los parámetros que se van a utilizar en este estudio, se establece lo siguiente:

Categorización de los vehículos

La fuente del ruido de tráfico se determina mediante la agrupación de cinco categorías independientes que poseen diferentes características en cuanto a la emisión de ruido [19]:

- Categoría 1. Vehículos ligeros.
- Categoría 2. Vehículos pesados medianos.
- Categoría 3. Vehículos pesados.
- Categoría 4. Vehículos de dos ruedas.
- Categoría 5. Categoría abierta.

Siendo dividida en subclases independientes la categoría 4 para ciclomotores y motocicletas de mayor potencia. La categoría 5 que es opcional, podría englobar a los vehículos eléctricos o híbridos en un futuro, y, es justo lo que vamos a plantear aquí.

En este proyecto estarán presentes en los escenarios estos tipos de vehículos:

- Vehículos ligeros
- Vehículos pesados
- Vehículos de dos ruedas (motocicletas)
- Vehículos eléctricos

En este método, cada vehículo se representa mediante una fuente de un solo punto que se irradia de manera uniforme en el semiespacio por encima del suelo y se ubica a 0,05 metros por encima de éste. Tal y como se puede apreciar en la Figura 2:

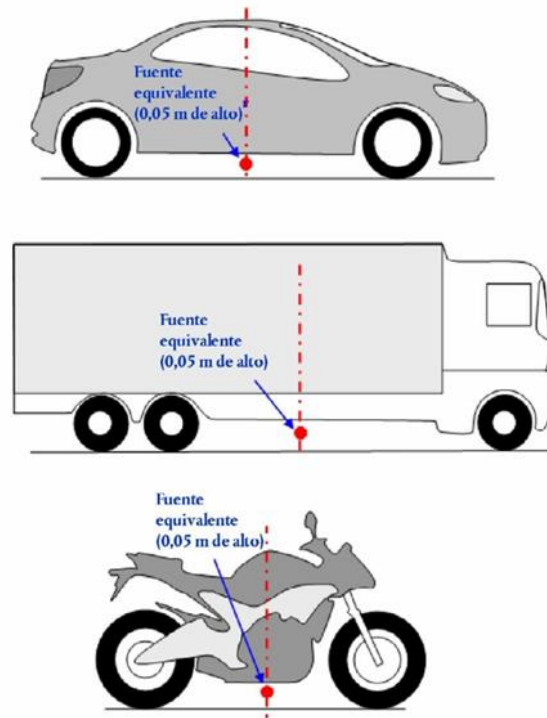


Figura 2. Localización de la fuente puntual en vehículos ligeros, vehículos pesados y vehículos de dos ruedas.

Indicadores de ruido

Los cálculos de ruido se definen en la gama de frecuencia de bandas de octava comprendida entre los 63 Hz y los 8 kHz. El nivel sonoro medio a largo plazo con ponderación A, se calcula mediante la suma de todas las frecuencias.

La ponderación de frecuencia 'A' es la ponderación más usada, y se utiliza para representar la respuesta del oído humano al ruido. Los resultados de estas mediciones se muestran como dBA [20].

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \sum_{i=1} 10^{(L_{Aeq,T,i} + A_i)/10}$$

Donde:

A_i , indica la corrección con ponderación A según la norma CEI 61672-1.

i , es el índice de la banda de frecuencias.

T , período de tiempo correspondiente al día, la tarde o la noche.

Intensidad de tráfico

La emisión de ruido de tráfico es representada mediante una fuente lineal que se caracteriza por su potencia sonora direccional por metro y por frecuencia. Esto se corresponde a la suma de la emisión sonora de cada uno de los vehículos individuales del flujo de tráfico. La implementación de cada vehículo individual del flujo requiere la aplicación de un modelo de tráfico:

$$L_{W',eq,line,i,m} = L_{W,i,m} + 10 \log\left(\frac{Q_m}{1000 \cdot v_m}\right)$$

Donde,

$L_{W',eq,line,i,m}$ es el nivel de potencia sonora direccional equivalente por metro para la categoría de vehículos m y la banda de frecuencia i , expresado en dB/m.

$L_{W,i,m}$ es el nivel de potencia sonora direccional instantáneo de un único vehículo de la categoría m y en la banda de frecuencia i .

Q_m , es el flujo de tráfico vehículos por hora de una categoría m .

v_m , es la velocidad media del flujo de tráfico de una categoría m .

Observaciones acerca del vehículo individual

La producción instantánea de ruido de un vehículo es definida mediante dos parámetros principales, la categoría del vehículo y la velocidad, y, puede ser corregida en función de varios efectos ambientales o específicos. Para cada vehículo de carretera, el modelo de emisión consiste en dos principales fuentes de ruido:

1. **Ruido de rodadura:** debido a la interacción neumático/carretera.
2. **Ruido de propulsión:** es producido por la cadena cinemática del vehículo (motor, escape, AVAS...).

Para simular el nivel de potencia acústica que producen los vehículos de combustión en los escenarios futuros se han seguido las indicaciones que aplica la norma CNOSSOS y la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del ruido, en lo referente a la evaluación del ruido ambiental [19].

Para los vehículos ligeros y pesados, la potencia sonora corresponde a la suma energética del ruido de rodadura y el de propulsión.

$$L_{W,i,m}(v_m) = 10 \log\left(10^{\frac{L_{WR,i,m}(v_m)}{10}} + 10^{\frac{L_{WP,i,m}(v_m)}{10}}\right)$$

$L_{W,i,m}(v_m)$, es el nivel de potencia de la fuente lineal.

$L_{WR,i,m}(v_m)$, es el nivel de potencia sonora para el ruido de rodadura.

$L_{WP,i,m}(v_m)$, es el nivel de potencia sonora para el ruido de propulsión.

En el caso de las motocicletas, la fuente de ruido es generada por el ruido de propulsión:

$$L_{W,i,m=4}(v_{m=4}) = L_{WP,i,m=4}(v_{m=4})$$

Condiciones de referencia

Los coeficientes y las ecuaciones de caracterización de la fuente son válidos para las siguientes condiciones de referencia [19]:

- Velocidad constante del vehículo.
- Carretera sin pendiente.
- Temperatura del aire de referencia: $\tau_{ref} = 20^\circ\text{C}$.
- Un pavimento de referencia virtual, que conste de aglomerado asfáltico denso 0/11 y pavimento mezclado SMA 0/11, con una antigüedad de entre 2 y 7 años y en un estado de mantenimiento representativo.
- Pavimento seco.
- Neumáticos sin clavos.

Ruido de rodadura

El nivel de potencia sonora del ruido de rodadura es definido como:

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

Donde:

Los coeficientes $A_{R,i,m}$ y $B_{R,i,m}$ son dados en el **Anexo A.1** en bandas de octava para cada categoría de vehículo y con una velocidad de referencia (v_{ref}) de 70 km/h.

$L_{WR,i,m}$, es el nivel de potencia para el ruido de rodadura.

$\Delta L_{WR,i,m}(v_m)$, se refiere a la suma de los coeficientes de corrección que deben ser aplicados a la emisión de ruido de rodadura para condiciones específicas de la carretera o del vehículo que se desvíen de las condiciones de referencia. En este caso no aplica, lo explicamos a continuación:

$$\Delta L_{WR,i,m}(v_m) = \Delta L_{WR,road,i,m}(v_m) + \Delta L_{studded\ tyres,i,m=1}(v_m) + \Delta L_{WR,acc,i,m} + \Delta L_{W,temp}(\tau)$$

Donde:

$\Delta L_{WR,road,i,m}(v_m)$, es el efecto de ruido de rodadura sobre una superficie con propiedades sonoras distintas a las de las condiciones de referencia anteriormente comentadas.

- Esta propiedad será nula para todos los vehículos, por tener propiedades similares a la superficie de referencia.

$\Delta L_{studded\ tyres,i,m=1}(v_m)$, coeficiente de corrección para los vehículos ligeros equipados con neumáticos con clavos.

- No aplica debido a que el flujo de tráfico de vehículos ligeros no lleva equipados neumáticos con clavos.

$\Delta L_{WR,acc,i,m}$, se debe al efecto sobre el ruido de rodadura de un cruce con semáforo o una rotonda.

- Es nulo porque asumimos que los vehículos transitan a una velocidad constante, no se tiene en cuenta la aceleración y deceleración de los vehículos.

$\Delta L_{W,temp}(\tau)$, es un término de corrección para una temperatura media τ diferente de la temperatura de referencia.

- En este caso, como tomamos por temperatura media la de referencia $\tau = 20^\circ\text{C}$, este término de corrección también es nulo [18].

Ruido de propulsión

El nivel de potencia sonora del ruido de propulsión se define como:

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

Los coeficientes $A_{P,i,m}$ y $B_{P,i,m}$ son dados en el **Anexo A.1** en bandas de octava para cada categoría de vehículo y con una velocidad de referencia (v_{ref}) de 70 km/h.

$L_{WP,i,m}$, es el nivel de potencia para el ruido de propulsión.

$\Delta L_{WP,i,m}(v_m)$, corresponde a la suma de los coeficientes de corrección que deben aplicarse a la emisión de ruido de propulsión para condiciones de conducción específicas o condiciones regionales reales que se desvían de las condiciones de referencia:

$$\Delta L_{WP,i,m}(v_m) = \Delta L_{WP,road,i,m}(v_m) + \Delta L_{WP,acc,i,m} + \Delta L_{WP,grad,i,m}(v_m)$$

$\Delta L_{WP,road,i,m}(v_m)$, tiene en cuenta el efecto del tipo de superficie de carretera sobre el ruido de propulsión, al igual que pasa con el efecto de ruido de rodadura ($\Delta L_{WR,road,i,m}(v_m)$).

- Como se ha especificado con anterioridad, también es nulo por tener propiedades similares a la superficie de referencia.

$\Delta L_{WP,acc,i,m}$, efecto de la aceleración y deceleración de los vehículos en las intersecciones.

- Al igual que se ha explicado anteriormente con el ruido de rodadura, será nulo.

$\Delta L_{WP,grad,i,m}(v_m)$, el efecto de la pendiente de la carretera.

- También será nula, debido a que la superficie de estudio no presenta cuestas y se trata de una vía plana.

En conclusión, todos estos conceptos y definiciones serán fundamentales para su aplicación en los escenarios propuestos en este estudio del **apartado 7**, que tienen como objetivo analizar el impacto acústico generado y calcular la evaluación de la población expuesta al ruido.

2.4. Software utilizado

En este apartado se describen las herramientas digitales empleadas para llevar a cabo los cálculos y las simulaciones necesarias en este proyecto.

2.4.1. ArcGis Desktop

Es un sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica [22], la cuál es pública para que cualquier usuario pueda acceder a ella. Utiliza Sistemas de Información Geográfica (SIG), que son herramientas que almacenan dicha información digital, a la cual se les anexan información atributiva mediante tablas. Estas tablas recogen datos descriptivos, lo cual permite que el usuario realice consultas, análisis, gráficos e informes relativos a los datos espaciales [23]. En resumen, un sistema SIG nos posibilita estructurar la información geográfica, visualizarla, aplicar algoritmos para el procesado y explotación de la información presente en el sistema, y, editar los elementos y atributos disponibles en las diferentes capas [24].

ArcGis contiene un conjunto de productos software comercializados por ESRI (*Environmental Systems Research Institute*), entre los que destacan los siguientes:

- ArcCatalog: se trata de un explorador de archivos SIG. Nos ofrece una vista integrada y unificada de los archivos de datos, bases de datos y documentos de ArcGis que se encuentran disponibles. Además, contiene un conjunto de barras de herramientas que se utilizan para visualizar datasets y realizar tareas de administración de trabajo e información en ArcGis [25].
- ArcToolbox: consiste en una caja de herramientas SIG que se usan para el geoprocesamiento de los datos.
- ArcMap: es una herramienta de visualización y edición de mapas. Permite visualizar las diferentes capas, elabora simbologías de presentación de los diversos objetos, y a su vez, crea y edita líneas y polígonos para generar los elementos que componen los modelos acústicos.
- ArcScene: es una aplicación que permite la visualización 3D de archivos SIG.

Finalmente, este programa maneja formatos de datos espaciales denominados shapefiles (.shp), que almacenan la ubicación geométrica y la información de los atributos de las entidades geográficas [26]. Este tipo de datos es extraído y reutilizado para poder trabajar en programas de simulación de ruido ambiental.

2.4.2. CadnaA (*Computer Aided Noise Abatement*)

Es un software diseñado para el cálculo, presentación, evaluación y predicción del ruido ambiental. Tiene como objetivo estudiar la inmisión de ruido, ya sea de plantas industriales, nuevos esquemas viales, ferroviarios o de incluso ciudades enteras y áreas urbanizadas. Es una excelente herramienta para la elaboración y el cálculo de mapas estratégicos de ruido [27].

3. Objetivos

Este proyecto tiene como objetivo principal el análisis y la comprensión del impacto que presenta la implementación del sistema AVAS en los vehículos eléctricos sobre la contaminación acústica y la seguridad vial en entornos urbanos.

Como objetivos secundarios se presentan estos dos:

- **Evaluación de la influencia del sistema AVAS:** se investigará como el sistema AVAS afecta a los niveles de ruido producido por los vehículos eléctricos cuando está activado. Se compararán los niveles de presión sonora medidos por el sonómetro entre los vehículos eléctricos con AVAS y los vehículos de combustión interna a velocidades bajas. El objetivo es determinar si el nivel de ruido generado por los vehículos eléctricos es equiparable al de los vehículos de combustión, evaluando así la eficacia del sistema AVAS en mejorar la seguridad vial sin generar un impacto acústico significativo.
- **Exposición al ruido de la población e impacto en escenarios urbanos residenciales:** se calculará la exposición al ruido de la población en entornos donde predominan los vehículos eléctricos en comparación con los vehículos de combustión interna. Además, se examinará como una mayor presencia de vehículos eléctricos, ya sea con el sistema AVAS activado o desactivado, influye en diferentes escenarios urbanos residenciales, evaluando si el ruido generado por este sistema es lo suficientemente significativo como para que la población quede expuesta a niveles relevantes de contaminación acústica. Este objetivo busca identificar los beneficios potenciales de la reducción de este tipo de contaminación y entender mejor cómo la proliferación de vehículos eléctricos afecta a la dinámica del ruido ambiental en áreas habitadas, y, por tanto, cómo puede contribuir a una mejora general en la calidad de vida de los residentes.

4. Especificaciones y restricciones de diseño

Tal y como se ha comentado en los objetivos de este proyecto, para determinar una **evaluación en la influencia del AVAS**, se han realizado una serie de medidas con una instrumentación idónea para el caso y en una superficie dura y rasante alejada de todo obstáculo que pueda influir en el campo acústico, como objetos reflectantes o espectadores, y, de cualquier tipo de ruidos ambientales: tráfico, industrial o residencial entre otros. Se han utilizado tres tipos de vehículos de dimensiones similares: un coche eléctrico y dos vehículos de combustión interna (uno de gasolina y otro de diésel).

Es necesario mencionar que para el vehículo eléctrico utilizado ha sido imposible deshabilitar el sistema AVAS, por lo que en el siguiente apartado de **6. Resultados de la evaluación de la influencia del AVAS** siempre estará activado. No obstante, en el apartado **5.2.2.**, se realiza una estimación de los niveles que podría alcanzar un vehículo eléctrico sin el sistema AVAS activado, lo cual resultará fundamental en el apartado **7. Resultado simulaciones de los diferentes escenarios y exposición al ruido**, donde se compararán los niveles de ruido generados con el sistema activado y desactivado en los distintos escenarios simulados de exposición al ruido.

Para evaluar los niveles de presión sonora de los diferentes tipos de vehículos, se emplearon dos métodos principales: el método Pass-By y el método Stop&Go. De esta manera, se puede investigar la diferencia que existe entre los vehículos de combustión interna y los eléctricos.

- **Método Pass-By:** en este método, los vehículos se desplazan a velocidades constantes a lo largo de la pista de ensayo. Las velocidades utilizadas son 10, 20, 30, 40 y 50 kilómetros por hora, que son representativas de los límites habituales en áreas residenciales y alrededores. Este método se utiliza para evaluar el ruido generado por los vehículos en movimiento constante, proporcionando datos sobre el nivel de ruido en condiciones controladas, pero representativas de situaciones reales de tráfico [29].
- **Método Stop&Go:** este método simula una parada en un semáforo con el vehículo detenido en el centro de la pista y de forma perpendicular al micrófono de medición. Este enfoque permite evaluar el impacto del ruido generado por los diferentes tipos de vehículos durante las arrancadas y paradas, una situación común en entornos urbanos. Este método ayuda a identificar cómo la variación de la velocidad y el comportamiento del conductor influye en las emisiones sonoras.

El proceso llevado a cabo en este primer objetivo se refleja en el siguiente diagrama de bloques:

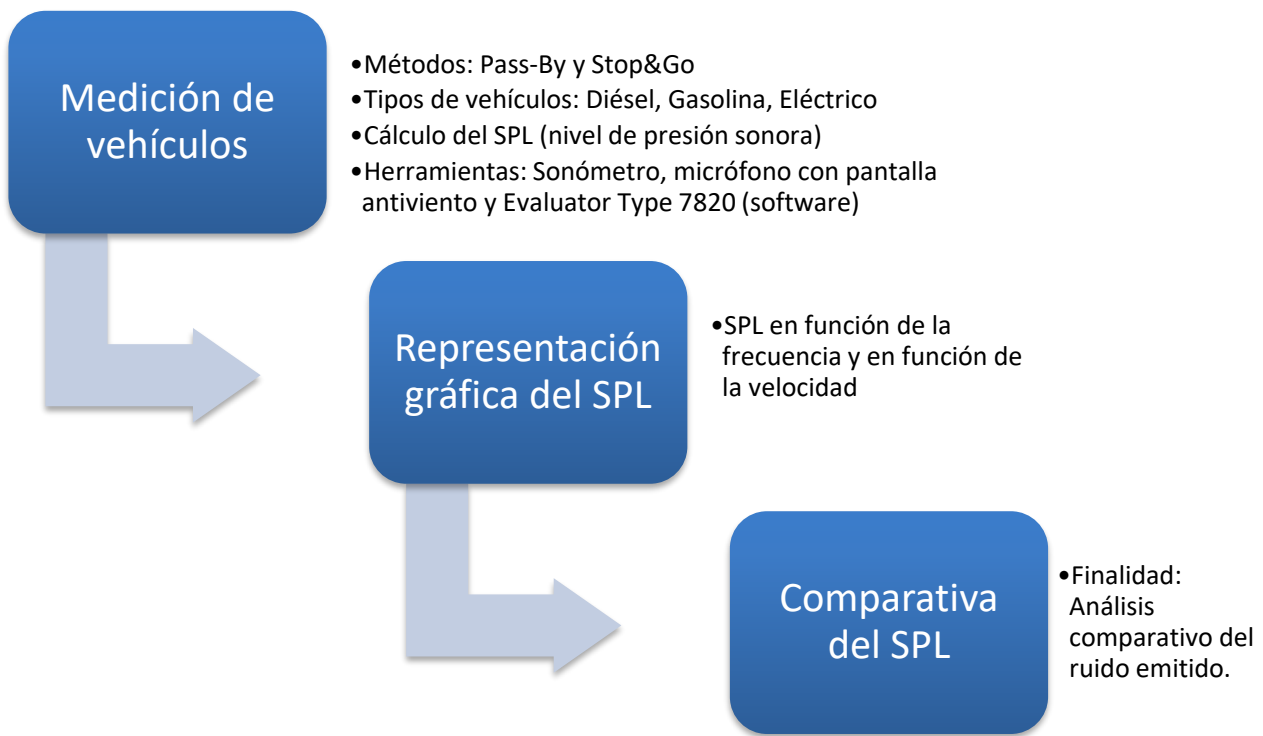


Figura 3. Diagrama de bloques para la comparativa de niveles de presión sonora entre los vehículos de combustión y el vehículo eléctrico.

Para evaluar la **exposición al ruido de la población y el impacto en escenarios urbanos residenciales** se ha seleccionado la calle Princesa de Madrid debido a su significativa actividad de tránsito de vehículos y su considerable cantidad de residentes. Los diferentes escenarios que se proponen para este análisis incluyen diversas combinaciones de vehículos con o sin el sistema AVAS activado, así como escenarios mixtos de vehículos eléctricos y de combustión interna.

Para la creación de dichos escenarios se ha descargado toda la información proveniente de la sede del Catastro sobre dicha calle. El número total de residentes para cada edificio se calcula en base al número de viviendas registrado en la sede del catastro. Este cálculo proporciona una estimación del número total de habitantes para cada edificio de la calle Princesa.

Además, se determinaron las alturas de los edificios utilizando datos catastrales y modificando las alturas desde ArcMap considerando para cada edificio la planta baja de 4 metros y 3,5 metros adicionales por cada planta superior.

Toda esta información, junto con las carreteras y las curvas de nivel se exportan desde ArcMap y se integran en el software de simulación CadnaA, donde para determinar la cantidad de personas expuestas al ruido se evalúan los receptores en fachada, es decir, se calculan en función de la distribución de micrófonos/receptores alrededor de cada edificio, permitiendo identificar los distintos niveles de presión sonora a los que están expuestos los residentes.

Este proceso se detalla en el apartado de metodología.

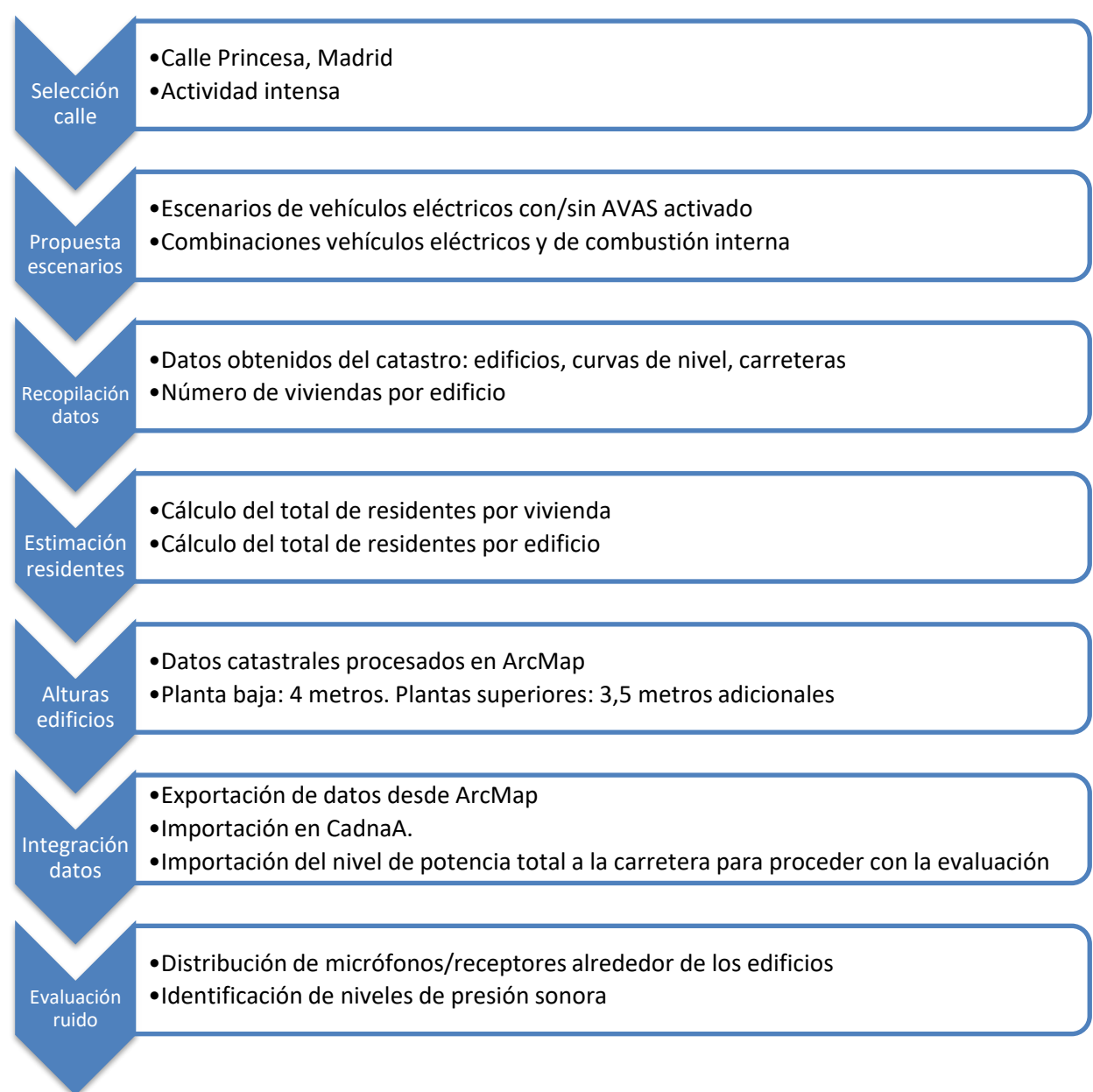


Figura 4. Diagrama de bloques para el proceso de evaluación de la exposición al ruido en escenarios urbanos.

5. Metodología

Este apartado se centra en escribir los procedimientos y técnicas utilizadas para evaluar el impacto acústico de los distintos tipos de vehículos en un entorno urbano, con especial atención al impacto que produce el sistema AVAS en los vehículos eléctricos. En el subapartado **5.1.**, se detallan los datos de entrada utilizados para analizar la influencia del sistema AVAS. Primero, se precisan las características de la pista de ensayo, lugar que se ha utilizado en la captación de los niveles de presión sonora para los tres tipos de vehículos usados (eléctrico, gasolina y diésel), así como los dos métodos de medición empleados: Pass-By, que consiste en medir el ruido mientras el vehículo circula a una velocidad constante, y Stop&Go, que simula una detención y un posterior arranque.

Luego, en el subapartado **5.2.**, se abordan los datos utilizados para la simulación de escenarios. Esto incluye el cálculo del nivel de potencia sonora de los vehículos eléctricos y la estimación de los niveles de presión sonora para este tipo de vehículo si el sistema AVAS no estuviera activado.

Posteriormente, se presentan los escenarios de simulación para evaluar el impacto acústico que producen los vehículos en un entorno urbano, acompañados del método empleado para el cálculo de la altura de los edificios, la estimación de los residentes que existen por edificio, y, concluyendo con la asignación de residentes por micrófono para un análisis preciso de la exposición de la población al ruido.

5.1. Datos de entrada para la evaluación de la influencia del sistema AVAS

5.1.1. Pista de ensayo y vehículos utilizados en la toma de datos

Para evaluar el impacto acústico de los distintos tipos de vehículos, el primer paso consiste en realizar mediciones en un entorno controlado que minimice interferencias externas. El objetivo es obtener datos precisos sobre los niveles de ruido generados por cada vehículo. Para ello, se ha seleccionado una pista de superficie dura y rasante, óptima para minimizar cualquier interferencia externa en el campo acústico. Expuesto a la única problemática que podría causar un fenómeno meteorológico como es el viento.

Antes de iniciar las mediciones, se calcula el ruido de fondo durante 5 minutos para garantizar que no hay fuentes de ruido temporales en las proximidades, y, al considerarse que alcanza un nivel bastante inferior al ruido que genera el vehículo, se procede con las primeras mediciones.

La pista de ensayo tiene una longitud de 50 metros, el micrófono se encuentra situado a 7,5 metros perpendicularmente desde el centro de la pista y el eje del micrófono se coloca a una altura de 1,5 metros sobre el suelo. Este posicionamiento asegura que las mediciones sean representativas y consistentes.

En estas pruebas, se han utilizado tres tipos diferentes de vehículos: dos de combustión interna (uno de diésel y otro de gasolina) y uno eléctrico. Todos éstos presentan una altura y unas dimensiones muy parecidas.



Figura 5. Ilustración del vehículo eléctrico Opel Mokka-e utilizado [16].



Figura 6. Ilustración del vehículo de gasolina Opel Grandland X utilizado.



Figura 7. Ilustración del vehículo de diésel Citroën Picasso utilizado.

Más adelante, se realiza una comparativa del nivel de presión sonora que generan los 3 distintos tipos de vehículos utilizando los ensayos introducidos en el apartado anterior y explicados de manera más detallada en los siguientes (5.1.2 y 5.1.3). Los tiempos de medida empleados para la obtención de los datos son los siguientes:

- **Método Pass-By:** para cada una de las velocidades evaluadas (10, 20, 30, 40 y 50 km/h), se establecen tiempos de medida de 12, 10, 8, 6 y 5 segundos respectivamente, permitiendo registrar con precisión la emisión sonora durante el paso del vehículo.
- **Método Stop&Go:** en este método, que simula una parada en el semáforo de 55 segundos, el tiempo de medida total es de 1 minuto y 7 segundos. Esto incluye 6 segundos antes de hacer la parada y otros 6 segundos adicionales para medir el ruido tras el arranque, a las distintas velocidades de salida indicadas en el apartado 5.1.3.

Estas medidas son extraídas mediante el software Evaluator Type 7820 procedente de la franquicia Brüel & Kjaer, utilizado para el análisis de datos de medición de ruido ambiental [17].

Seguidamente, se procede a explicar de manera más detallada estos dos ensayos.

5.1.2. Método Pass-By

La manera de certificar que un vehículo cumple con las especificaciones de emisiones de ruido es efectuar mediciones que se adecúen a los procedimientos definidos en las normas internacionales. Estas normas establecen un ensayo del ruido de la cadena cinemática y ruido de rodadura en las condiciones típicas de tráfico urbano [18].

En este método los vehículos se desplazan a velocidad constante a lo largo de la pista de ensayo. Estas velocidades han sido de 10, 20, 30, 40 y 50 kilómetros por hora, que hacen referencia a los límites habituales estipulados en un área residencial y alrededores.

Se realizan 3 medidas para cada una de las velocidades mencionadas por cada uno de los vehículos, en el caso de que uno de los resultados sea anómalo con respecto a los anteriores es necesario repetir la medición, y finalmente, se efectúa una media obteniendo el resultado con el que se extraen las tablas y gráficas mostradas en el apartado próximo (**6.1. Resultados Pass-By**).

Dicho método nos servirá para proporcionar una base en la evaluación del impacto acústico producido por los vehículos en zonas residenciales, donde los límites de velocidad son críticos para la calidad de vida de los habitantes.

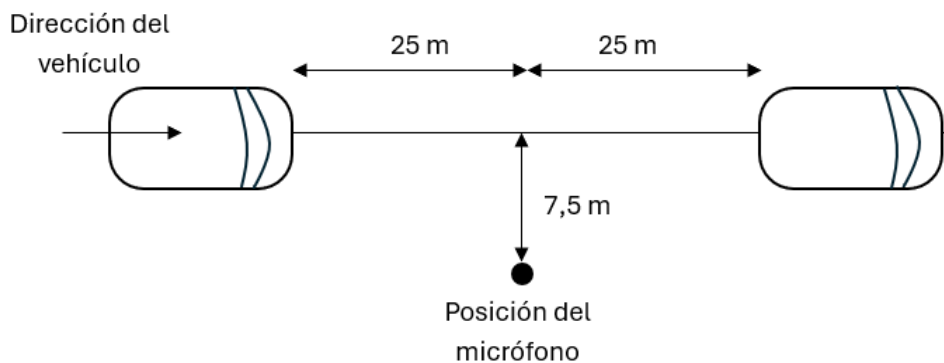


Figura 8. Representación del método de ensayo denominado Pass-By.

5.1.3. Método Stop&Go

En este otro método se ha simulado una parada en un semáforo (la parada se encuentra justo en el centro de la pista, perpendicular al micrófono de medida), y, tras un conteo de 55 segundos se pone en marcha a distintas velocidades. Se efectúan dos medidas en lugar de tres como se ha realizado en el método anterior para cada uno de los vehículos y se extrae la media.

Se alcanzan velocidades de 10, 15, 20, 25 y 30 kilómetros por hora tanto cuando se simula que el vehículo se pone en marcha tras la luz verde del semáforo, como antes de llegar a éste, disminuyendo la velocidad justo antes de parar en el centro de la pista de medida.

Este método es utilizado para medir el ruido generado por los vehículos en situaciones de parada y arranque, como ocurre en las intersecciones con semáforos o durante congestiones de tráfico [30].

En el apartado **6.2. Resultados Stop&Go**, se analizarán las diferencias de ruido entre los vehículos de combustión interna y el vehículo eléctrico.

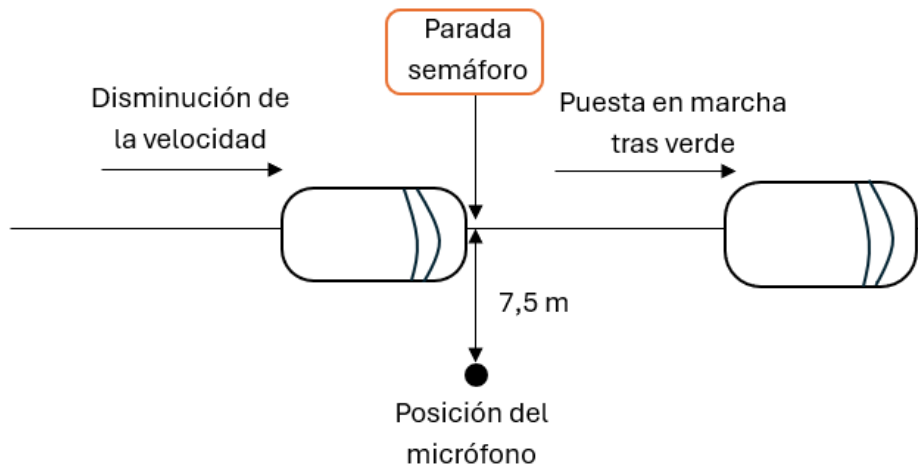


Figura 9. Representación del método de ensayo denominado Stop&Go.

5.2. Datos de entrada para la simulación de escenarios

5.2.1. Cálculo del nivel de potencia de los vehículos eléctricos

Para los vehículos eléctricos se han tomado los niveles de presión sonora que se han medido con el sonómetro comentados en el apartado anterior (**5.1.2. Método Pass-By**), definidos en la gama de frecuencias de las bandas de octava comprendidas entre 63 Hz y 8kHz. A esta medida y para calcular el nivel medio de potencia <<in situ>> por metro de fuente lineal (L'_W) se les ha aplicado una pérdida por propagación lineal, que proporciona una corrección para la radiación cilíndrica del sonido desde una fuente lineal, dada la distancia perpendicular (r) desde la fuente en metros.

Esta corrección de distancia se puede calcular para fuentes lineales finitas o infinitas y fuentes coherentes (por ejemplo: una fuente de ruido tonal) o incoherentes (por ejemplo: fuentes de ruido de banda ancha como el tráfico). En este caso como se trata de una fuente lineal finita (no coherente), L'_W ha sido calculada tal que así [21]:

$$L'_W = L_P + 10 \log r + 8 - 10 \log(2 \cdot \operatorname{atan} \frac{L}{2r}) \quad (1)$$

Donde:

L_P , es el nivel de presión sonora medido con el sonómetro.

r , es la distancia (7,5 metros) a la cual se ha colocado el sonómetro con respecto a la mitad de la pista de medición (Figura 8).

L , es la longitud de la fuente lineal.

Además, en este caso, tanto para los vehículos eléctricos como para los demás tipos de combustión interna utilizados en este estudio (ligeros, pesados y motocicletas), se ha utilizado una de las ecuaciones anteriores para tener en cuenta el flujo del tráfico:

$$L_{W'_{eq,line,i,m}} = L_{W_{i,m}} + 10 \log\left(\frac{Q_m}{1000 \cdot v_m}\right) \quad (2)$$

Donde como se ha indicado en el apartado 2.3. (**Intensidad de tráfico**),

$L_{W'_{eq,line,i,m}}$ es el nivel de potencia sonora direccional equivalente por metro para la categoría de vehículos m y la banda de frecuencia i , expresado en dB/m.

$L_{W_{i,m}}$ es el nivel de potencia sonora direccional instantáneo de un único vehículo de la categoría m y en la banda de frecuencia i

5.2.2. Ajuste de niveles de presión sonora para los vehículos eléctricos sin el AVAS activado

En este estudio se ha realizado la medición de un vehículo eléctrico con el sistema AVAS integrado, sin la posibilidad de desactivarlo. Para simular el comportamiento de un vehículo sin AVAS, se ha diseñado el siguiente enfoque, utilizando como base las mediciones obtenidas mediante el método Pass-By, descrito en detalle en el apartado 5.1.2.:

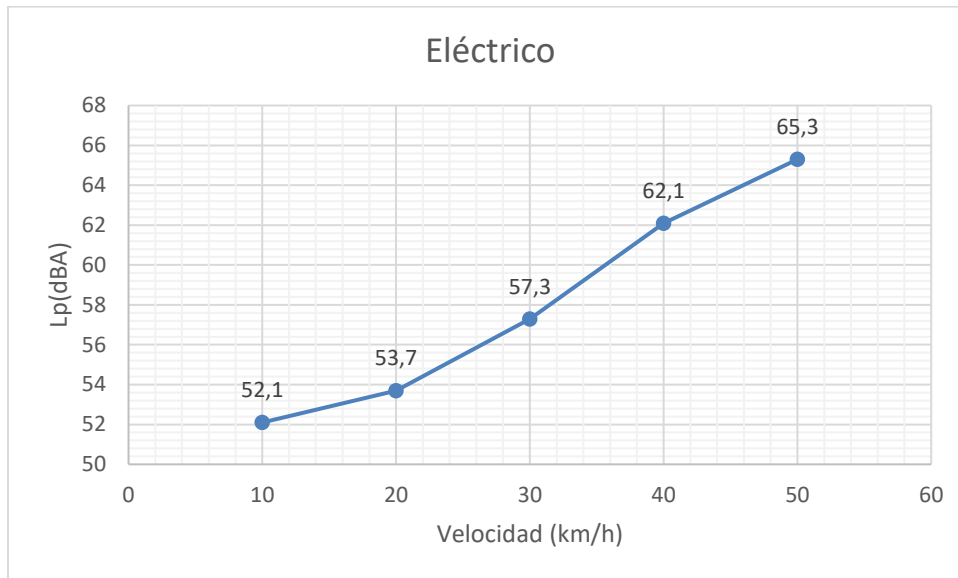


Figura 10. Niveles de presión sonora en dBA con respecto a la velocidad alcanzada en km/h para un vehículo eléctrico.

Tras extraer la gráfica para los niveles de presión sonora que transmite un vehículo eléctrico a diferentes velocidades, nos quedamos con los niveles que produce a más de 20 kilómetros por hora, dado que estos niveles serían iguales en vehículos eléctricos sin importar si tiene el AVAS activado o no, ya que sobrepasa la velocidad límite donde el AVAS puede actuar.

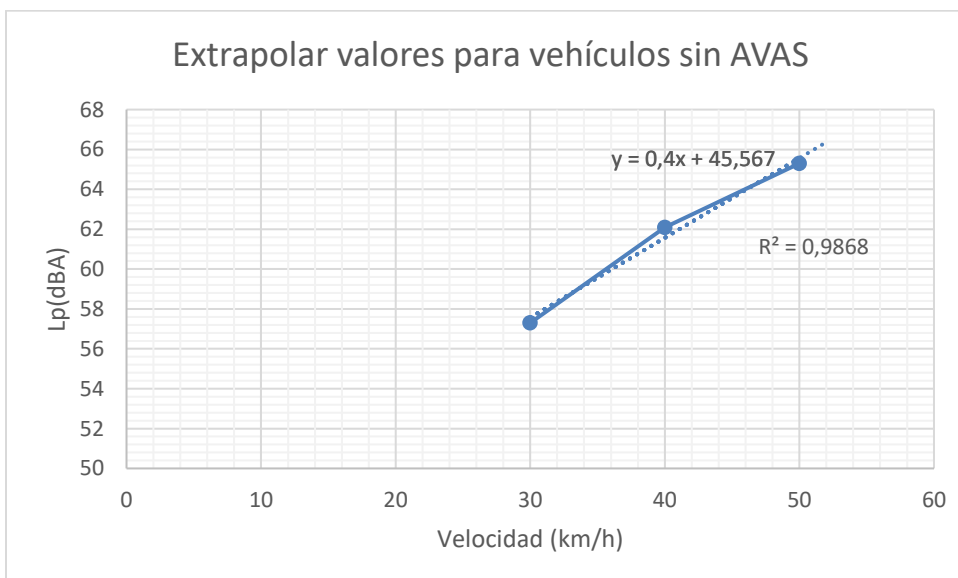


Figura 11. Niveles de presión sonora alcanzados a velocidades mayores de 20 km/h.

A partir de los niveles registrados en la gráfica anterior, se obtiene la ecuación en el gráfico para posteriormente extrapolar los niveles de presión sonora si el AVAS no estuviera activado. Esta es la ecuación:

$$y = 0,4x + 45,567$$

A raíz de la ecuación anterior se obtiene la siguiente gráfica y los distintos valores para los vehículos eléctricos sin AVAS, centrándonos únicamente en el valor del nivel de presión sonora alcanzado a las velocidades de 10 y 20 km/h, ya que es el intervalo donde dicho sistema puede estar activado.

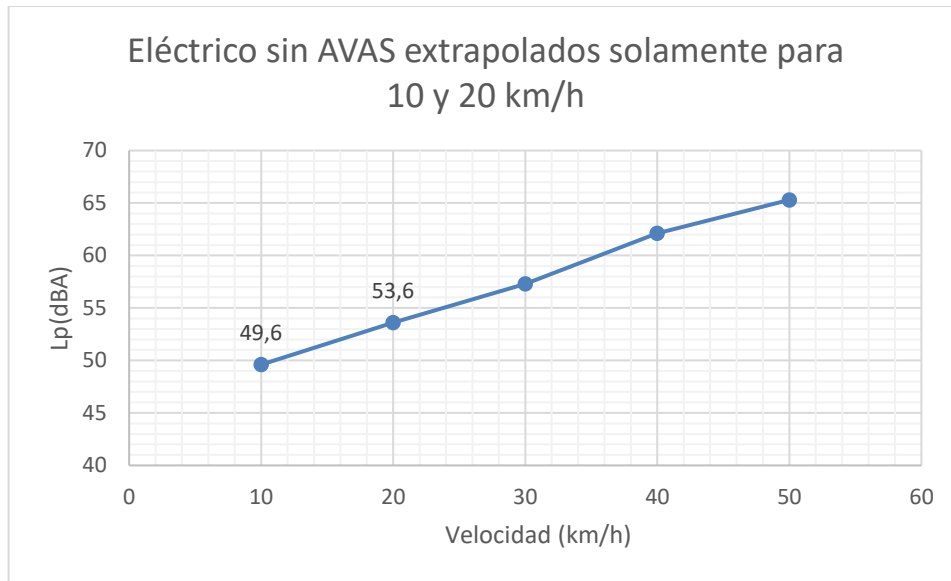


Figura 12. Niveles de presión sonora para los vehículos eléctricos sin AVAS activado a las velocidades de 10 y 20 km/h.

Como puede apreciarse en esta figura con respecto a la Figura 10, hay una variación de 2,5 dB a la velocidad de 10 km/h, pero una diferencia insignificante para la velocidad de 20 km/h.

Para estimar aún más dicha diferencia con AVAS y sin AVAS del nivel de presión sonora a la velocidad de 20 km/h y poder así sacar mejores conclusiones en el **apartado 7**, se ha extrapolado con la línea de tendencia y la ecuación en el gráfico de la Figura 10, la cual presenta el AVAS activado, y, se han tomado nuevos valores. Esta es la ecuación que se ha tenido en cuenta:

$$y = 0,348x + 47,66$$

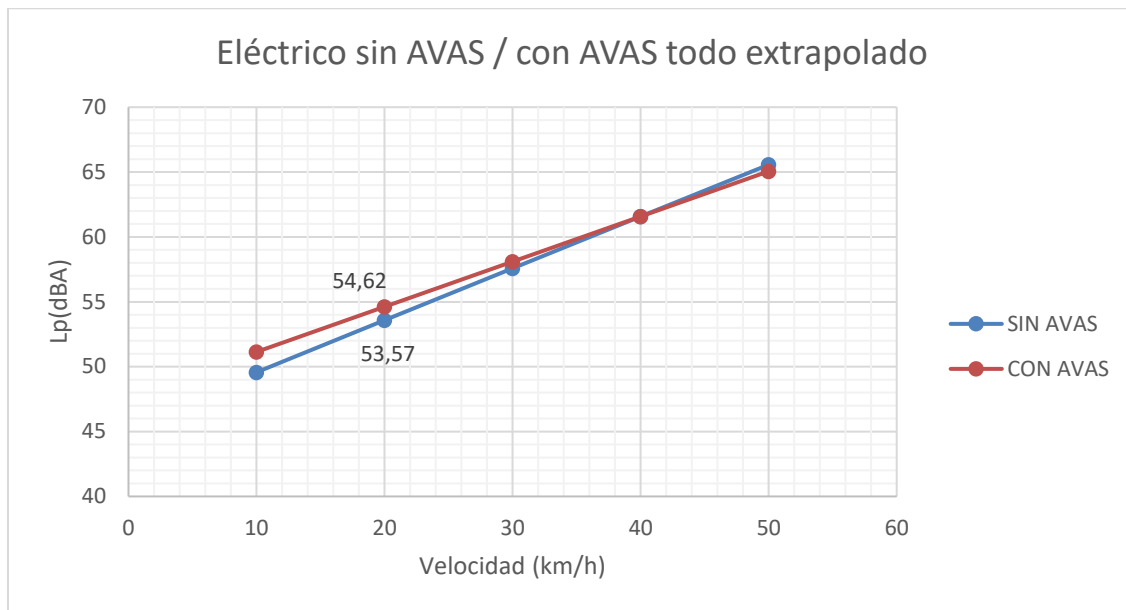


Figura 13. Diferencia de nivel de presión sonora a la velocidad de 20 km/h para vehículos con el AVAS activado y sin activar.

Finalmente, la diferencia resultante a velocidades bajas ha sido de 2,5 dB para 10 km/h y 1,05 dB para 20 km/h.

5.2.3. Propuesta de escenarios

Para el presente estudio, se busca evaluar un escenario urbano que presente una elevada actividad vehicular durante el día, donde el tránsito sea denso, los edificios circundantes posean varias plantas, y, por tanto, exista una considerable cantidad de residentes. Este tipo de entorno permite analizar el impacto acústico en situaciones de tráfico intenso y exposición directa de los residentes al ruido. En este contexto, se ha seleccionado la calle Princesa de Madrid, una vía pública que conecta la plaza de la Moncloa con la plaza de España y que cumple con los requisitos necesarios para este análisis.

La elección de la calle Princesa responde a su alta densidad de tráfico y a que las edificaciones que las rodean están estructuradas por varias plantas. La observación del flujo del tráfico se llevó a cabo a las 11:00 a.m. y se contabilizaron 390 vehículos atravesando la calzada en un período de media hora. Al extrapolar estos datos, se estima que aproximadamente 780 vehículos transitan por esta calle en una hora. Esta estimación nos ofrece una visión clara del nivel de tráfico diurno en esta vía, proporcionando una base adecuada para las simulaciones.

Además, cabe mencionar que la velocidad máxima permitida en la calle es de 30 kilómetros por hora, un factor clave en el análisis del impacto acústico de los vehículos, especialmente en lo que respecta al sistema AVAS en vehículos eléctricos, que es más relevante a bajas velocidades.

La propuesta de escenarios consiste en lo siguiente:

➤ **Escenario de únicamente vehículos eléctricos**

Dado que el sistema AVAS deja de activarse a velocidades superiores a 20 kilómetros por hora y este estudio se centra en evaluar el impacto acústico de los vehículos eléctricos cuando operan a bajas velocidades, se espera que los niveles de presión sonora registrados en estos casos sean significativamente más bajos. Los escenarios presentados buscan comparar el impacto que tiene la integración del AVAS en la sociedad, analizando la diferencia en la percepción acústica cuando el AVAS está activado frente a cuando está desactivado.

Tomando los niveles que se han detallado en los apartados anteriores **5.2.1.** y **5.2.2.**, se han propuesto los siguientes escenarios:

Casos	Vehículos eléctricos con AVAS activado	Vehículos eléctricos sin AVAS activado	Velocidad
CASO 1	50%	50%	10-20 km/h
CASO 2	0%	100%	10-20 km/h
CASO 3	100%	0%	10-20 km/h

➤ **Escenarios de vehículos eléctricos y de combustión a velocidad constante.**

En este escenario, la proporción de vehículos de combustión y vehículos eléctricos que circulan a más de 20 km/h se reduce progresivamente, lo que resulta en una disminución gradual de la contaminación acústica a medida que los coches eléctricos que circulan a velocidades más bajas (10-20 km/h), con la mitad de ellos con el AVAS encendido y la otra mitad con el AVAS apagado, comienzan a predominar en la vía. Esta transición permite analizar como la reducción del ruido generado por los vehículos de combustión interna afecta al ambiente acústico, especialmente cuando la mayoría de los vehículos en circulación son eléctricos. Es importante destacar que, debido al impacto significativo que tienen los vehículos pesados en el ruido ambiental, se ha considerado que estos representen un 5% del total en cada escenario. Los casos propuestos son los siguientes:

Casos	Vehículos de combustión y eléctricos a 30 km/h	Vehículos eléctricos con y sin AVAS encendido a 10-20 km/h
CASO 1	100%	0%
CASO 2	75%	25%
CASO 3	50%	50%
CASO 4	25%	75%
CASO 5	0%	100%

Además, se contemplan otros dos casos adicionales:

Caso Eléctricos	Vehículos eléctricos con y sin AVAS encendido a 10-20 km/h	Vehículos eléctricos a velocidades de 30-40-50 km/h
	50%	50%

Caso Baja Velocidad	Vehículos eléctricos con y sin AVAS encendido a 10-20 km/h	Vehículos de combustión interna a 10-20 km/h
	50%	50%

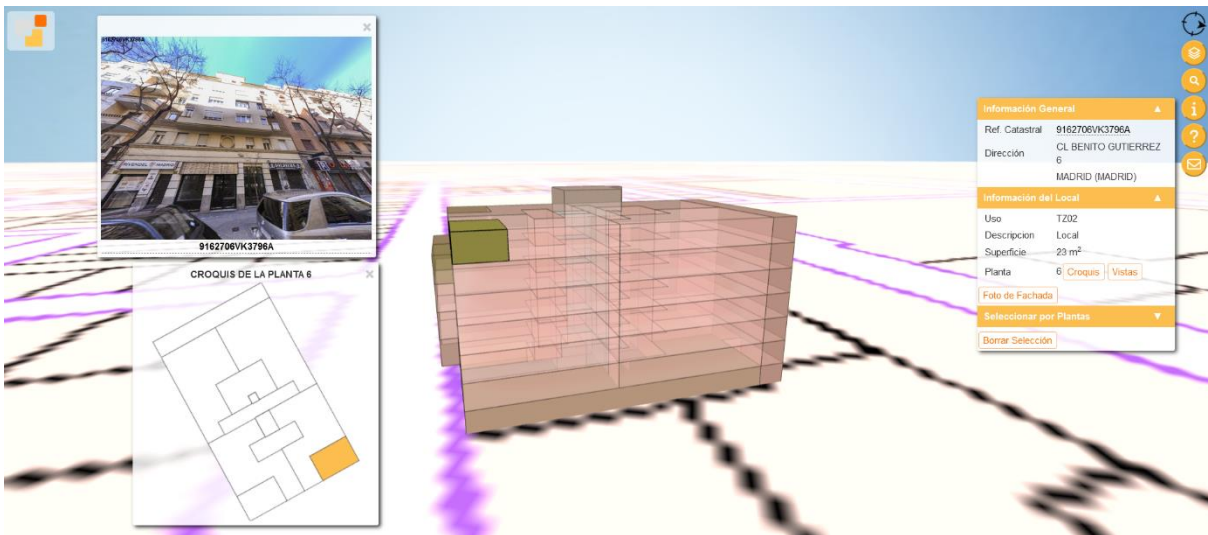


Figura 15. Representación del número de plantas sobre rasante de la calle Princesa visualizado desde la sede del catastro [33].

En conclusión, para calcular la altura de los edificios a partir del número de plantas se ha seguido el siguiente razonamiento:

$$altura [m] = \text{redondeo}(4 + ([numPlantas - 1] * 3,5))$$

Donde para la altura de la planta baja consideramos 4 metros, y para el resto de las plantas 3,5 metros. Finalmente, redondeamos el resultado a un número entero [24].

Los resultados se introducen como dato de altura para los edificios utilizados en nuestra simulación de ArcMap, que posteriormente se introducirán en formato shapefile (.shp) en el software de predicción de ruido ambiental, CadnaA.

BEZ	MARK	ID	WG	EINW	ALFAL	HA	HA ATT
CONSTR		CONSTRU00585	x	590	0	28	r
CONSTR		CONSTRU00587	x	1135	0	28	r
CONSTR		CONSTRU00609	x	1050	0	32	r
CONSTR		CONSTRU00609	x	0	0	32	r
CONSTR		CONSTRU01218	x	630	0	28	r
CONSTR		CONSTRU01219	x	600	0	32	r
CONSTR		CONSTRU01226	x	380	0	28	r
CONSTR		CONSTRU01946	x	940	0	25	r
CONSTR		CONSTRU01947	x	680	0	32	r
CONSTR		CONSTRU01948	x	255	0	28	r

Figura 16. Altura incorporada para cada uno de los edificios tras conocer su número de plantas en ArcMap.

5.2.5. Cálculo de los residentes para cada uno de los edificios

El procedimiento que se ha llevado a cabo en este apartado ha sido el recuento de residencias en la página oficial de la sede electrónica del catastro [33].

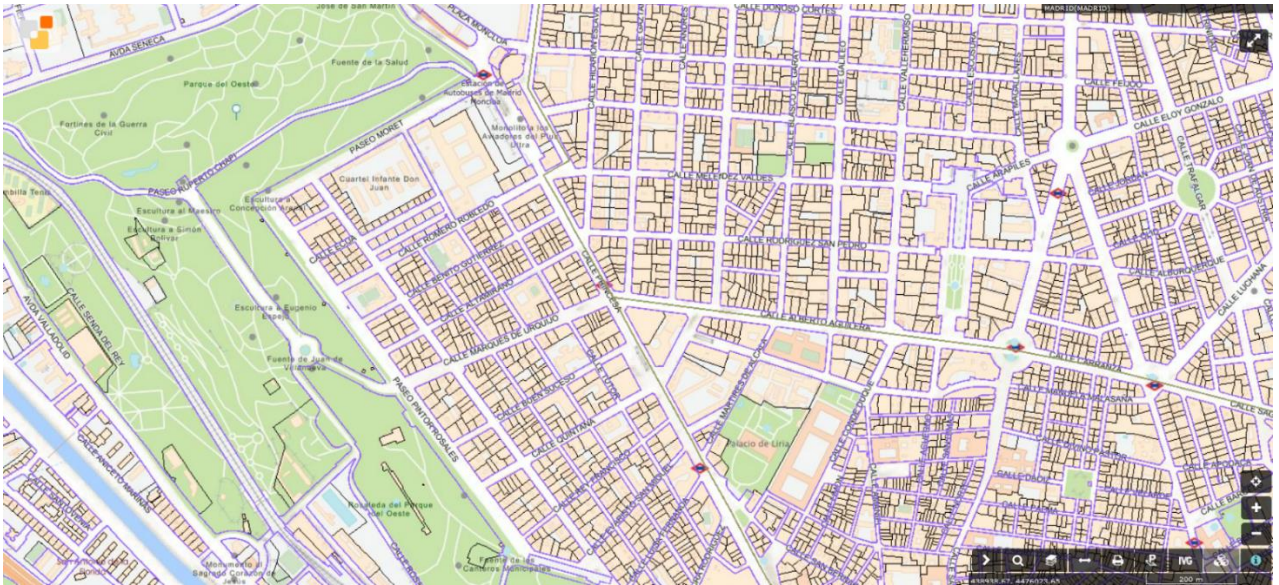


Figura 17. Visualización desde la sede del catastro [33] de los distintos bloques de los edificios característicos de la calle Princesa de Madrid.

LISTADO DE INMUEBLES DE NATURALEZA URBANA					
REFERENCIA CATASTRAL	DIRECCIÓN	USO	SUP. CONSTRUIDA (m ²)	AÑO	PARTICIPACIÓN DEL INMUEBLE
9361814VK3796A0001EH	CL PRINCESA 64 Pl:-1 Pt:A	Almacén-Estacionamiento	22	1950	1,00
9361814VK3796A0002RJ	CL PRINCESA 64 Pl:-1 Pt:B	Almacén-Estacionamiento	9	1950	0,40
9361814VK3796A0003TK	CL PRINCESA 64 Pl:-1 Pt:C	Almacén-Estacionamiento	5	1950	0,20
9361814VK3796A0004YL	CL PRINCESA 64 Pl:-1 Pt:D	Almacén-Estacionamiento	11	1950	0,50
9361814VK3796A0005UB	CL PRINCESA 64 Pl:-1 Pt:E	Almacén-Estacionamiento	5	1950	0,20
9361814VK3796A0006IZ	CL PRINCESA 64 Pl:-1 Pt:F	0000 Almacén-Estacionamiento	5	1950	0,20
9361814VK3796A0007OX	CL PRINCESA 64 Pl:-1 Pt:G	Almacén-Estacionamiento	9	1950	0,40
9361814VK3796A0008PM	CL PRINCESA 64 Pl:-1 Pt:H	Almacén-Estacionamiento	7	1950	0,30
9361814VK3796A0009AQ	CL PRINCESA 64 Pl:00 Pt:A	Comercial	125	1950	6,00
9361814VK3796A0010OX	CL PRINCESA 64 Pl:00 Pt:B	Comercial	129	1950	7,00
9361814VK3796A0011PM	CL PRINCESA 64 Pl:01 Pt:A	Residencial	110	1950	5,65
9361814VK3796A0012AQ	CL PRINCESA 64 Pl:01 Pt:B	Residencial	125	1950	8,60
9361814VK3796A0013SW	CL PRINCESA 64 Pl:02 Pt:A	Residencial	114	1950	5,95
9361814VK3796A0014DE	CL PRINCESA 64 Pl:02 Pt:B	Residencial	127	1950	8,30
9361814VK3796A0015FR	CL PRINCESA 64 Pl:03 Pt:A	Residencial	113	1950	5,65
9361814VK3796A0016GT	CL PRINCESA 64 Pl:03 Pt:B	Residencial	127	1950	8,30
9361814VK3796A0017HY	CL PRINCESA 64 Pl:04 Pt:A 0000	Residencial	113	1950	5,65
9361814VK3796A0018JU	CL PRINCESA 64 Pl:04 Pt:B 0000	Residencial	127	1950	8,30
9361814VK3796A0019KI	CL PRINCESA 64 Pl:05 Pt:A	Residencial	113	1950	5,80
9361814VK3796A0020HY	CL PRINCESA 64 Pl:05 Pt:B	Residencial	127	1950	8,30
9361814VK3796A0021JU	CL PRINCESA 64 Pl:06 Pt:A	Residencial	99	1950	5,75
9361814VK3796A0022KI	CL PRINCESA 64 Pl:06 Pt:B	Residencial	111	1950	7,55

Figura 18. Plantilla Excel utilizada para el conteo de residencias de los edificios expuestos en la calle Princesa.

Una vez terminado el recuento de residencias se le asignan los residentes. Según el Instituto Nacional de Estadística (INE), se establece que el número medio de habitantes por hogar es de 2,54 personas en 2021. Esta cifra no ha variado prácticamente en 10 años atrás, siendo de 2,58 en 2011 [34].

Por tanto, el método que se ha empleado para calcular el número de miembros por residencia en este estudio ha sido el siguiente:

$$\text{Número residentes} = \text{Número viviendas} * 2,5$$

Tras el recuento de residencias para cada uno de los edificios que se visualizan en la próxima Figura 32, y el método que se ha explicado recientemente en la determinación de residentes por vivienda, se ha adquirido la siguiente tabla:

Tabla 1. Número total de residentes por cada uno de los edificios.

Edificios	Viviendas	Residentes
1	247	618
2	376	940
3	222	555
4	273	683
5	180	450
6	64	160
7	116	290
8	368	920
9	44	110
10	102	255
11	449	1123
A	253	633
B	235	588
C	119	298
D	53	133
E	53	133
F	0	0
G	128	320
H	0	0

5.2.6. Asignación de residentes por micrófono

Para entender los resultados obtenidos en el apartado **7. Resultados simulaciones de los diferentes escenarios y exposición al ruido**, es necesario explicar cómo se ha realizado la asignación de residentes por micrófono:

Primero, se han dividido los receptores del edificio en dos grupos usando la mediana del nivel de presión sonora registrado por ellos. Los receptores que tienen niveles de presión sonora inferiores a la mediana se descartan, quedándonos solo con aquellos que tienen niveles superiores a la mediana.

A continuación, se asignan los residentes a los receptores con niveles de ruido superiores a la mediana. Este reparto se realiza únicamente si hay al menos un receptor en el rango de niveles de presión sonora considerado. Por ejemplo, si en un edificio no se detecta ningún receptor con niveles de ruido entre 55 y 60 dB, no se asignará ningún residente a esa franja sonora. De esta manera, solo se consideran los receptores que realmente registran niveles significativos de ruido para la asignación de residentes, asegurando una representación más precisa de la exposición al ruido.

Además, con esto se consigue que los micrófonos que han sido contabilizados sean los más expuestos a la calle Princesa de Madrid.

Para conocer el procedimiento que se ha seguido en el cálculo de las personas expuestas al ruido, se explica de manera detallada en el **Anexo A.3** mediante un ejemplo.

6. Resultados de la evaluación de la influencia del AVAS

En este apartado se presentan los resultados obtenidos tras la aplicación de los métodos y procedimientos descritos en los apartados anteriores. Los objetivos principales de este apartado se centran en analizar como el sistema AVAS afecta a los niveles de ruido de los vehículos eléctricos en comparación con los de combustión interna, asegurando que no se excedan los niveles que puedan contribuir a la contaminación acústica.

Inicialmente, se presentan las gráficas correspondientes a los niveles de presión sonora captados por el sonómetro para cada vehículo, considerando tanto en función de la frecuencia (van de 100Hz a 5kHz) como de la velocidad, aplicando los métodos de Pass-By y Stop&Go anteriormente mencionados.

Posteriormente, se realizan observaciones específicas para clarificar el objetivo de este análisis, destacando las diferencias clave entre los vehículos eléctricos y los vehículos de combustión interna en cuanto a su comportamiento acústico.

6.1. Resultados Pass-By

Vehículo eléctrico

Los resultados medidos con el sonómetro en la pista de ensayo para el vehículo eléctrico se encuentran en la tabla 36 del **Anexo A.2** donde se hace referencia a esta gráfica.

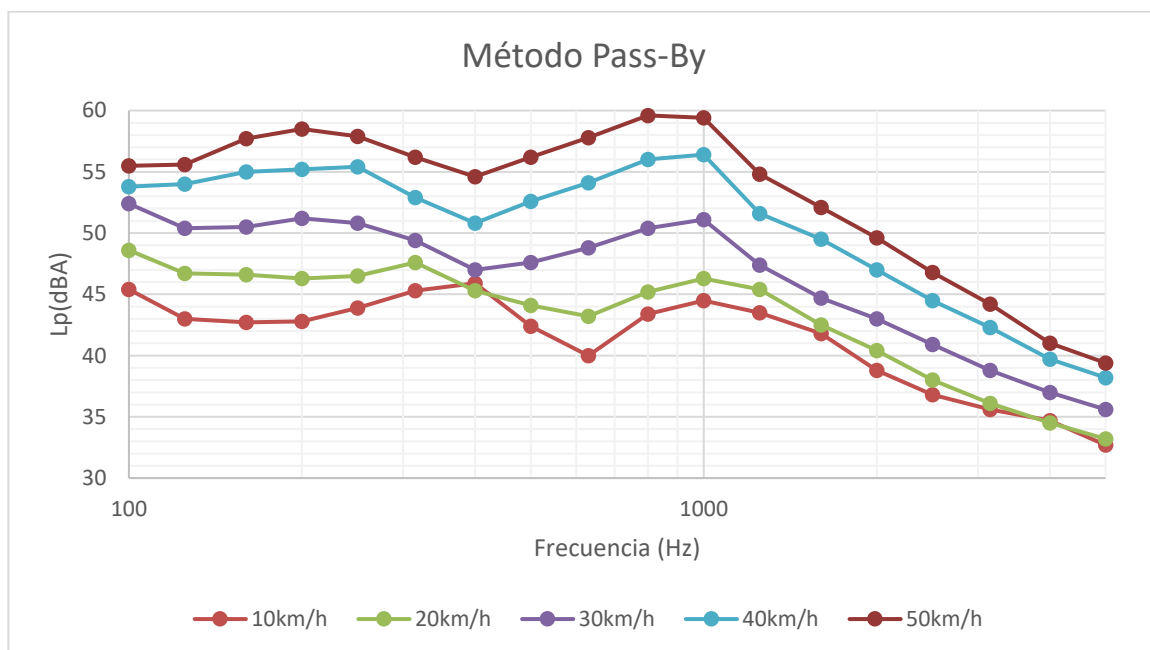


Figura 19. Representación gráfica del nivel de presión sonora ejercida por el vehículo eléctrico en función de la frecuencia mediante el método Pass-By.

Cabe destacar de esta Figura 19 que los niveles de presión sonora se incrementan para este tipo de vehículos en las velocidades de 10 y 20 km/h debido a que el sistema AVAS está activado y no es posible desactivarlo.

La representación gráfica del nivel de presión sonora medida en función de la velocidad, en referencia a la Tabla 2, podemos visualizarla en la Figura 10 del **apartado 5.2.2**.

Tabla 2. Nivel de presión sonora ejercida por el vehículo eléctrico en función de la velocidad mediante el método Pass-By.

Velocidad (km/h)	SPL (dBA)
10	52,1
20	53,7
30	57,3
40	62,1
50	65,3

Los cálculos obtenidos en este tipo de vehículo se utilizan de referencia en los escenarios presentados más adelante en este proyecto (**apartado 7**).

Vehículo de gasolina

Los resultados medidos con el sonómetro en la pista de ensayo para el vehículo de gasolina se encuentran en la tabla 38 del **Anexo A.2** donde se hace referencia a esta gráfica.

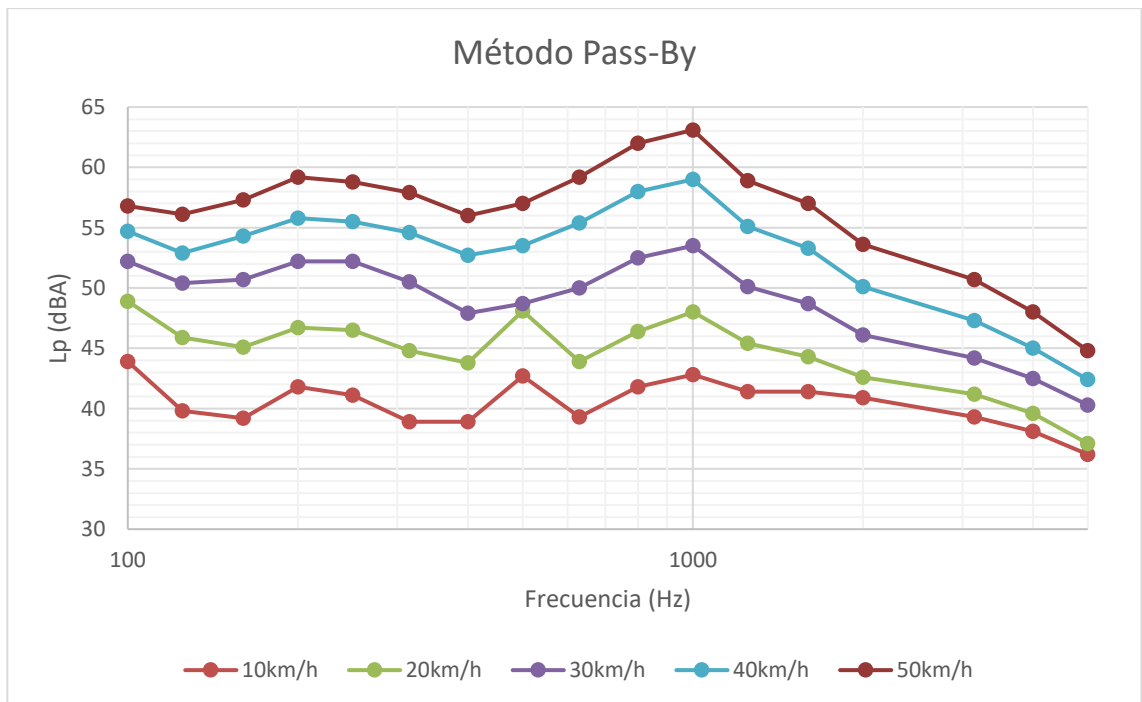


Figura 20. Representación gráfica del nivel de presión sonora ejercida por el vehículo de gasolina en función de la frecuencia mediante el método Pass-By.

Tabla 3. Nivel de presión sonora ejercida por el vehículo de gasolina en función de la velocidad mediante el método Pass-By.

Velocidad (km/h)	SPL (dBA)
10	51,4
20	55,0
30	59,6
40	64,5
50	68,3

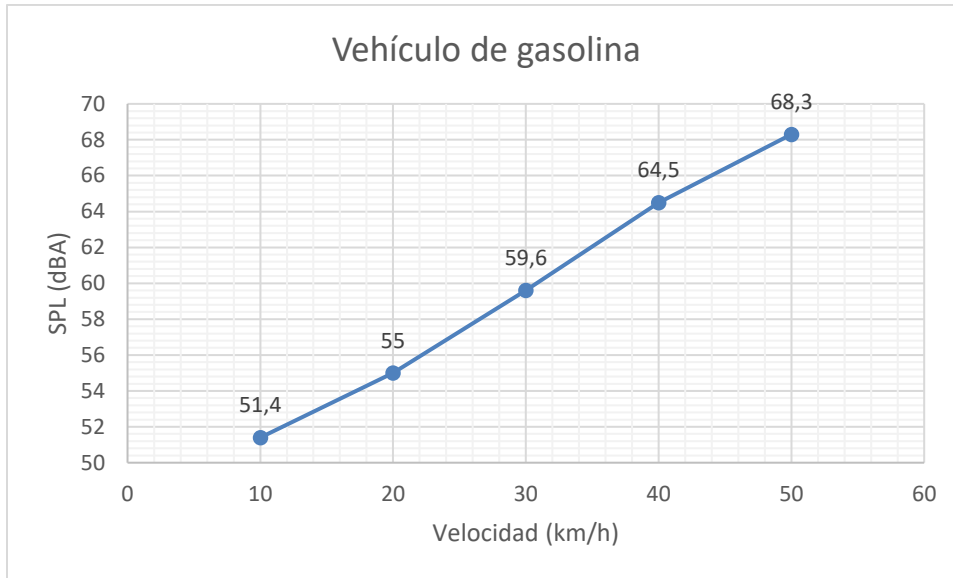


Figura 21. Representación del nivel de presión sonora en función de la velocidad para el vehículo de gasolina.

Vehículo de diésel

Los resultados medidos con el sonómetro en la pista de ensayo para el vehículo de diésel se encuentran en la tabla 40 del **Anexo A.2** donde se hace referencia a esta gráfica.

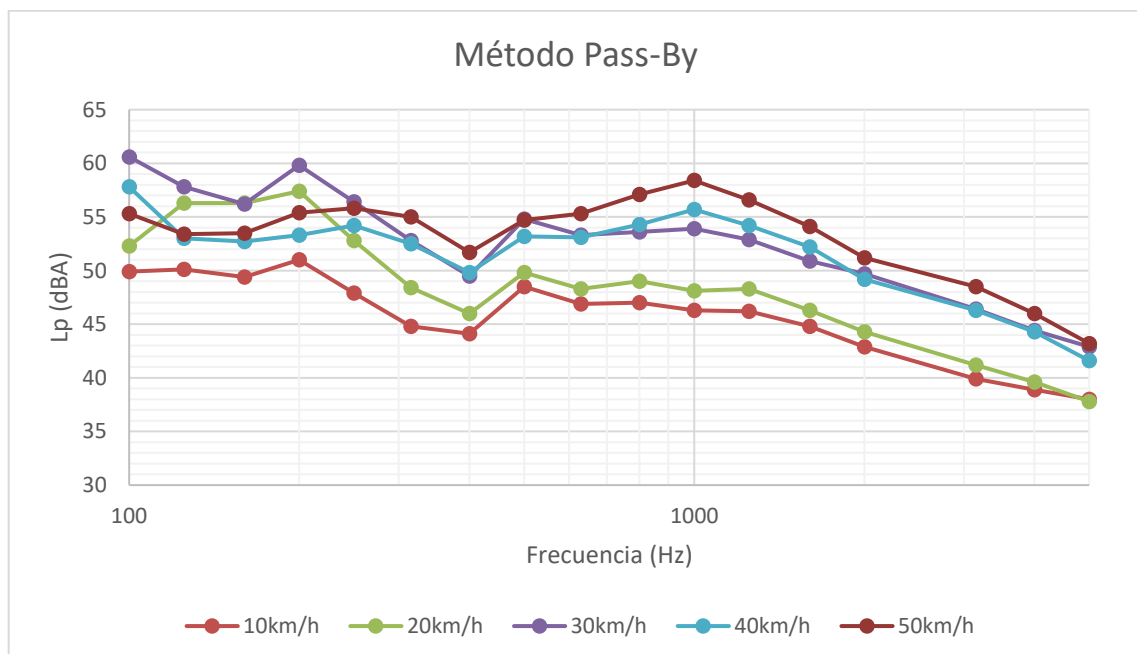


Figura 22. Representación gráfica del nivel de presión sonora ejercida por el vehículo de diésel en función de la frecuencia mediante el método Pass-By.

Tabla 4. Nivel de presión sonora ejercida por el vehículo de diésel en función de la velocidad mediante el método Pass-By

Velocidad (km/h)	SPL (dBA)
10	55,4
20	57,6
30	62,2
40	62,3
50	64,6

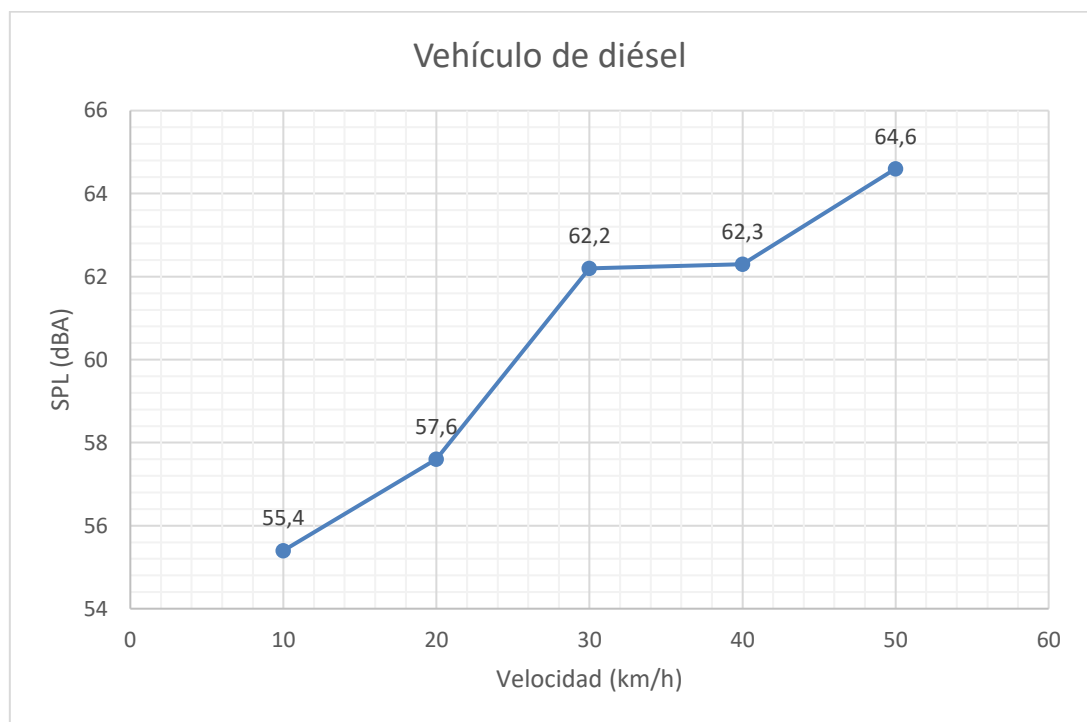


Figura 23. Representación del nivel de presión sonora en función de la velocidad para el vehículo de diésel.

Observaciones

Como se puede apreciar en las gráficas anteriores (Figuras 20, 22 y 23), exponer a un vehículo a velocidades bajas causa que el nivel de presión sonora sea mayor a frecuencias bajas. A partir de 1kHz, el nivel de presión sonora empieza a disminuir para las frecuencias más altas.

Si nos fijamos en la gráfica para las frecuencias menores de 1 kHz, los niveles tienen varios picos, esto es debido al ruido de admisión y de escape, donde el primero se refiere al sonido generado por el flujo de aire aspirado hacia un espacio y el segundo es aire caliente expulsado al exterior [28].

La fuente de ruido dominante va a depender de la velocidad del vehículo y su funcionamiento [29]. En velocidades inferiores a 50 km/h, el dominante es el motor, para velocidades mayores es el ruido de rodadura y por encima de los 80 km/h se trata del ruido aerodinámico.

Comparativa del nivel de presión sonora para los tres tipos de vehículos

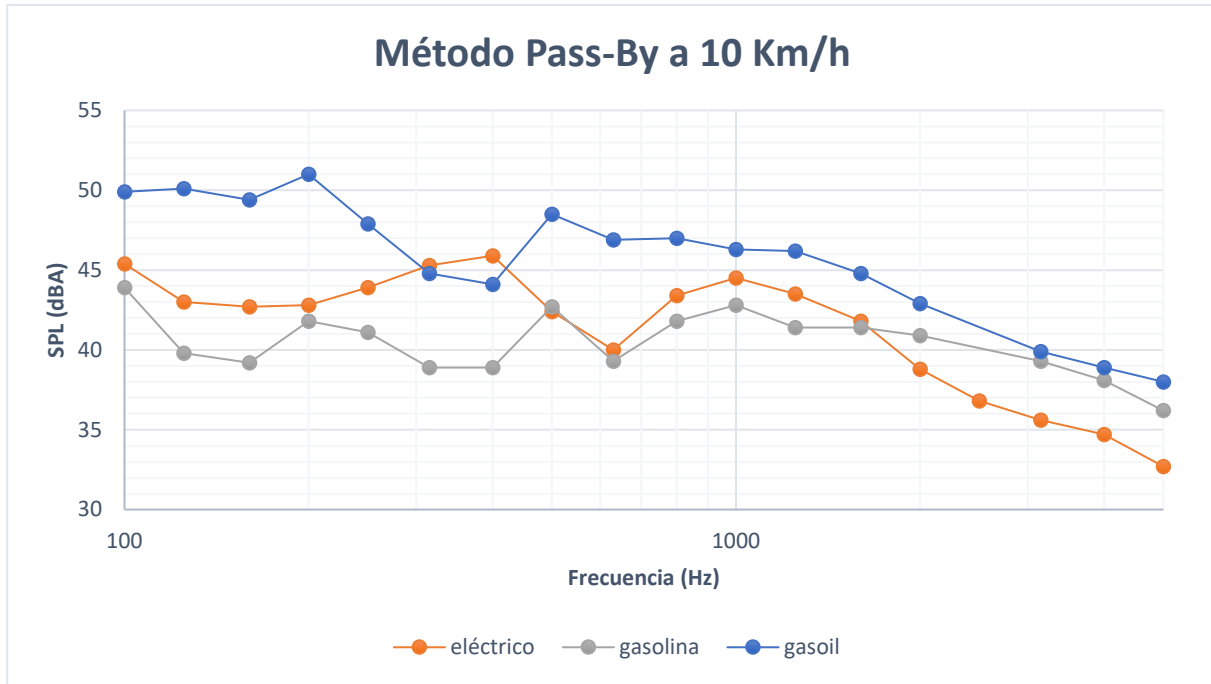


Figura 24. Comparación de la representación gráfica del nivel de presión sonora para los 3 tipos de vehículos en función de la frecuencia mediante el método Pass-By a 10 km/h.

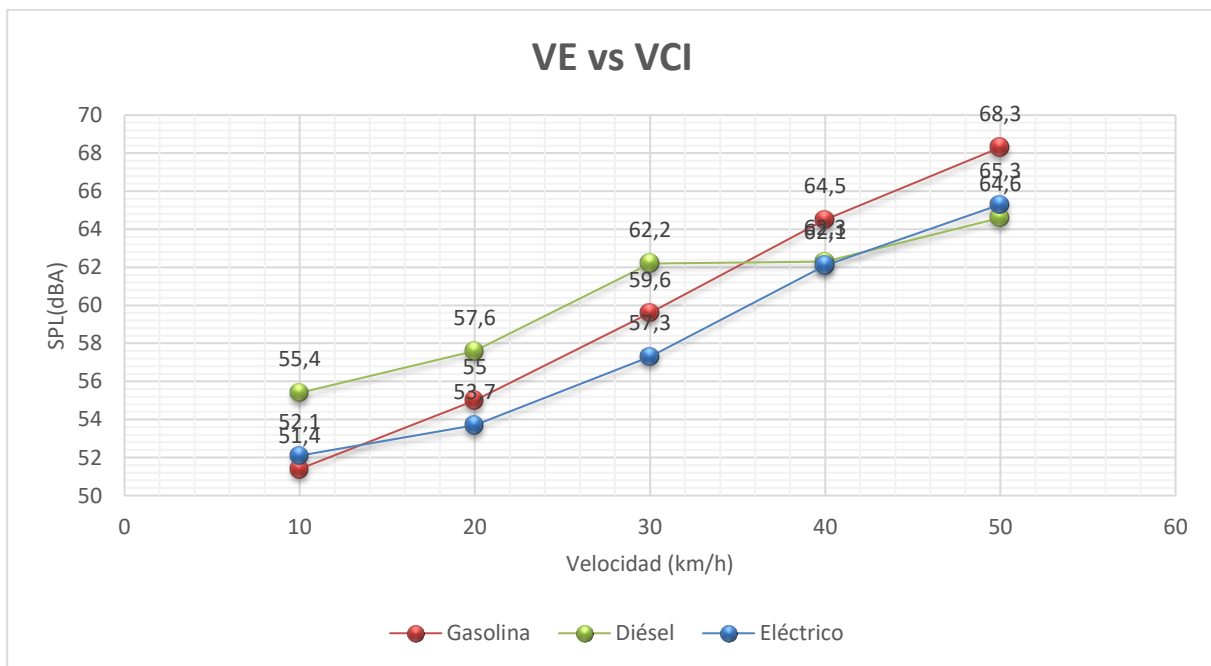


Figura 25. Comparación del nivel de presión sonora total (SPL) entre vehículos de combustión interna (VCI) y vehículos eléctricos (VE) a distintas velocidades.

Podemos contemplar en ambas figuras que el coche eléctrico por naturaleza emite menor ruido debido a que cuenta con un motor eléctrico. El ruido proveniente del motor de los VCI [30] es mayor, especialmente para los vehículos de gasolina, ya que tiene un mayor límite de revoluciones que el de diésel. Para regímenes de motor bajos y medios, los motores de gasolina emiten menos ruido que los de diésel, siendo de igual forma ligeramente superiores con respecto al VE.

Cabe destacar que estas medidas pueden verse afectadas por diversos motivos:

- **Desviaciones en la trayectoria del vehículo:** durante las mediciones, es posible que alguno de los vehículos haya experimentado un ligero desvío de su trayectoria respecto al centro de la pista, alejándose o acercándose más de los 7,5 metros previstos desde el sonómetro. Aunque estos desvíos puedan parecer mínimos (del orden de un par de metros como máximo), puede haber afectado a la precisión de los datos recogidos.
- **Variaciones en la velocidad media:** otro factor que puede haber alterado los resultados es la variabilidad en la velocidad del vehículo durante el trayecto. Un pequeño incremento o decremento en la velocidad media, aunque sea leve, podría haber influido.
- **Condiciones del viento:** un viento más fuerte o desfavorable en determinados momentos podría haber interferido con la propagación del sonido, distorsionando los niveles de presión sonora registrados.

6.2. Resultados Stop&Go

Una de las situaciones más comunes en entornos urbanos es la arrancada de los vehículos cuando están parados es un semáforo. En este caso, destacan las bajas frecuencias debido al efecto motriz del ruido del motor [29].

Los resultados medidos con el sonómetro en la pista de ensayo para el vehículo eléctrico se encuentran en la tabla 37 del **Anexo A.2** donde se hace referencia a esta gráfica.

Vehículo eléctrico

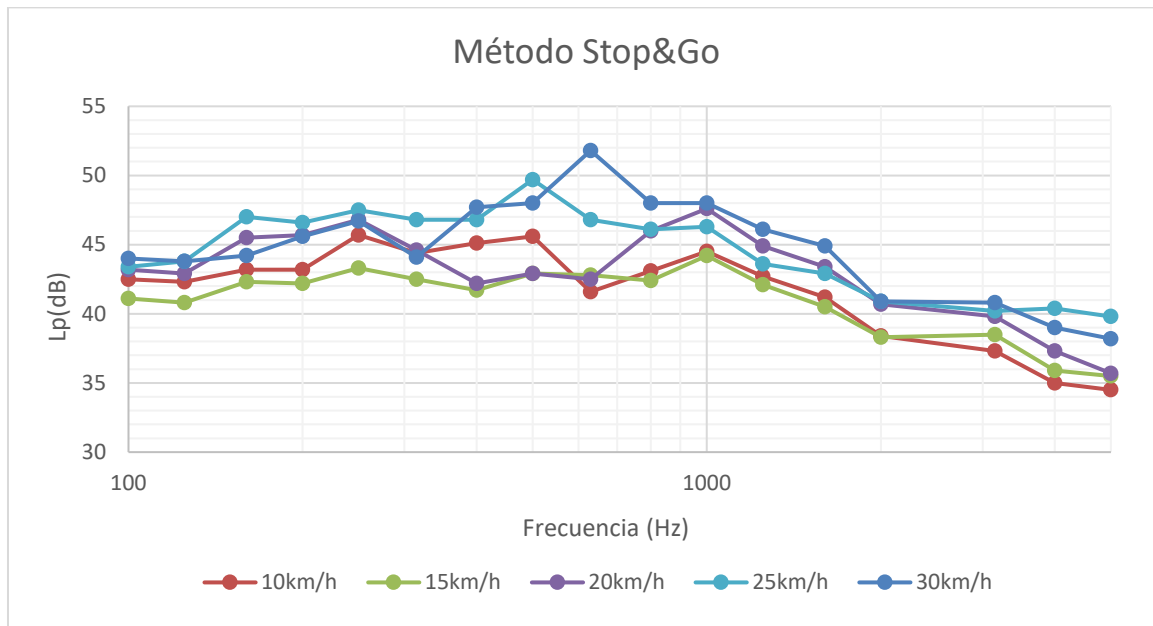


Figura 26. Representación gráfica del nivel de presión sonora en función que ejerce el vehículo eléctrico en función de la frecuencia mediante el método Stop&Go.

Vehículo de gasolina

Los resultados medidos con el sonómetro en la pista de ensayo para el vehículo de gasolina se encuentran en la tabla 39 del **Anexo A.2** donde se hace referencia a esta gráfica.

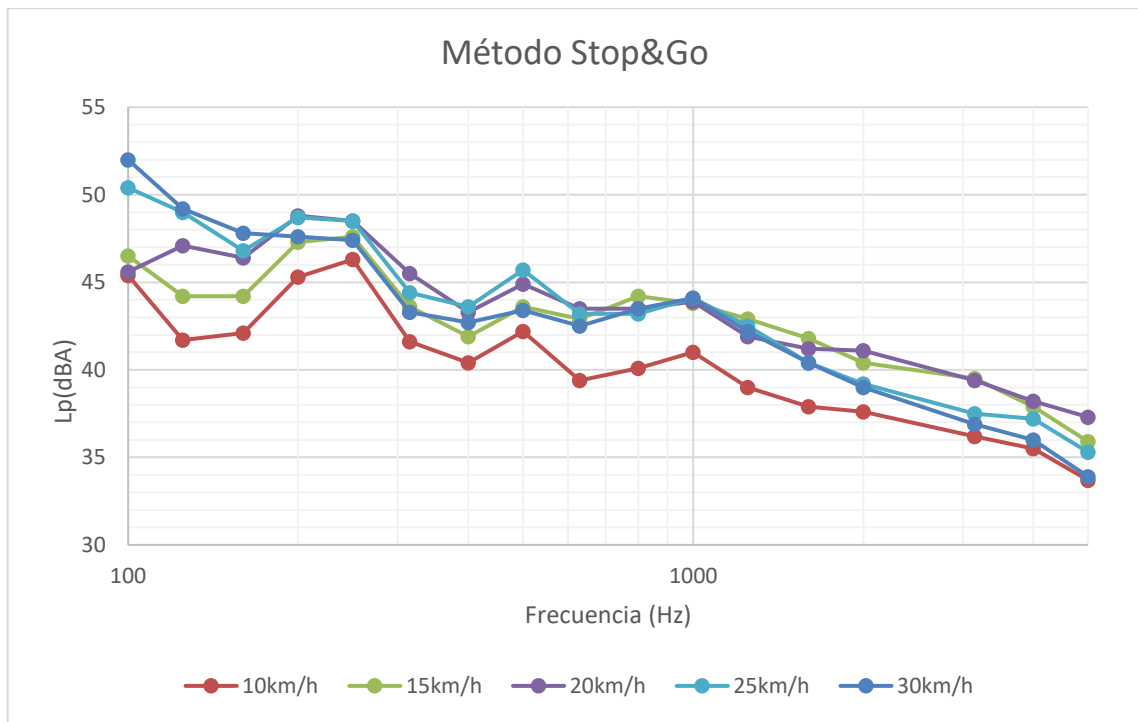


Figura 27. Representación gráfica del nivel de presión sonora en función que ejerce el vehículo de gasolina en función de la frecuencia mediante el método Stop&Go.

Vehículo de diésel

Los resultados medidos con el sonómetro en la pista de ensayo para el vehículo de diésel se encuentran en la tabla 41 del **Anexo A.2** donde se hace referencia a esta gráfica.

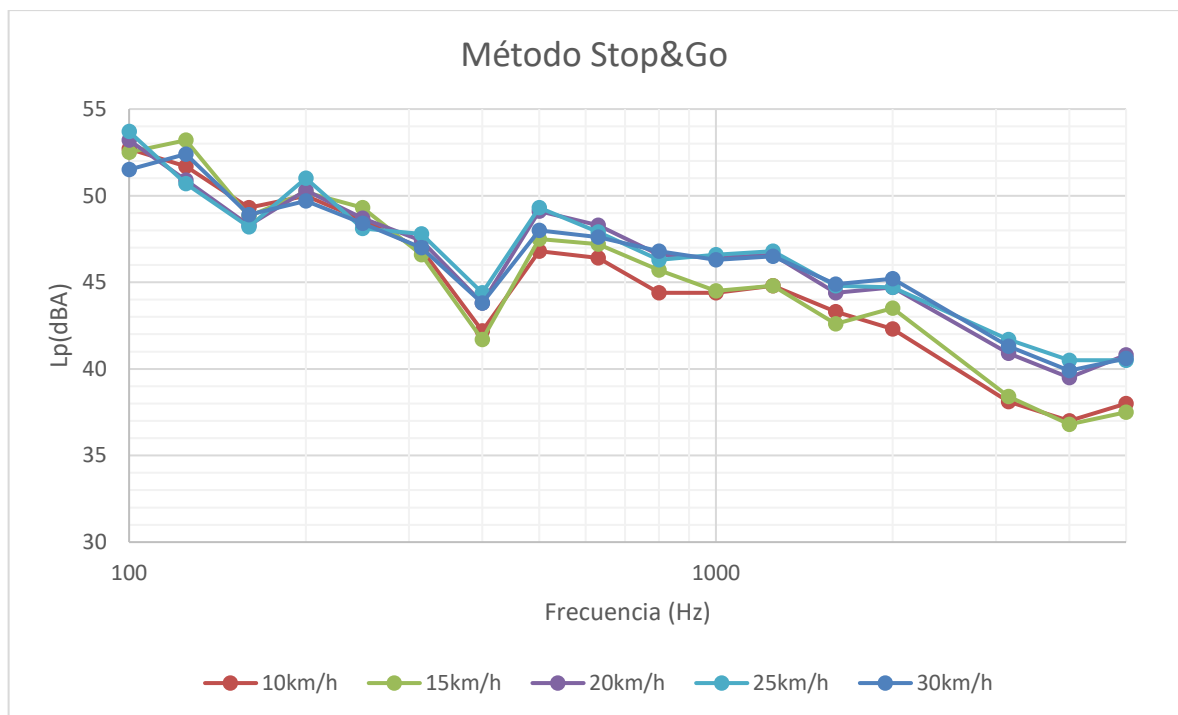


Figura 28. Representación gráfica del nivel de presión sonora en función que ejerce el vehículo de gasolina en función de la frecuencia mediante el método Stop&Go.

Comparativa de niveles para los tres tipos de vehículos

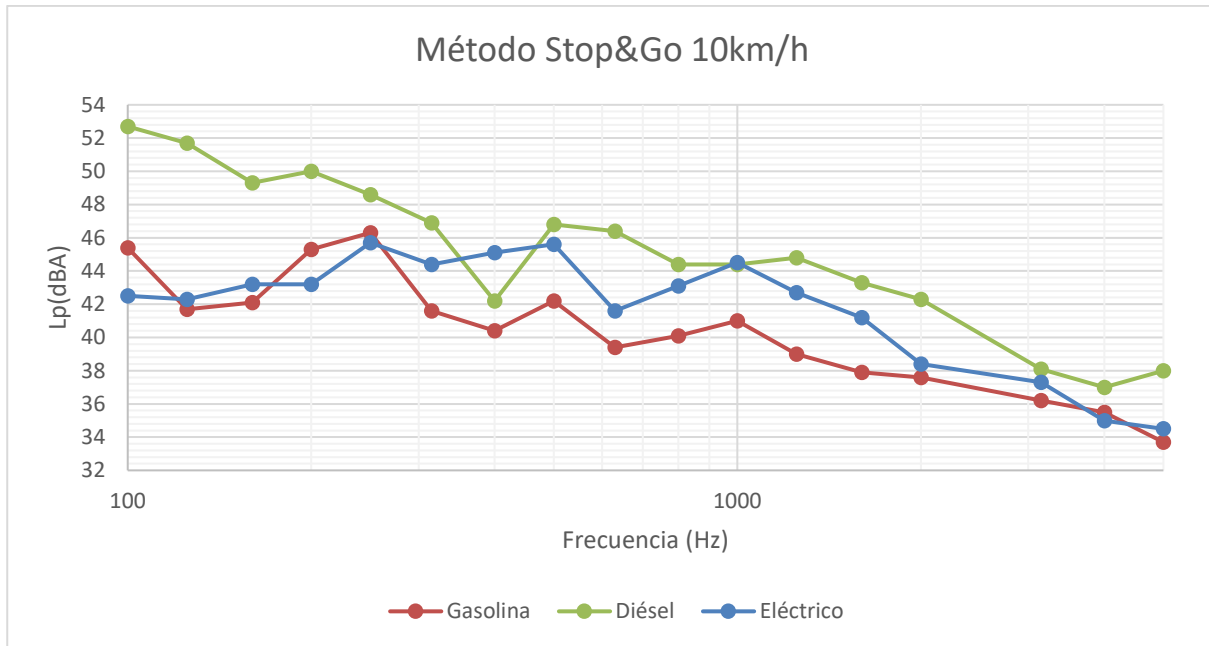


Figura 29. Comparación del nivel de presión sonora entre vehículos de combustión interna (VCI) y vehículos eléctricos (VE) en función de la frecuencia y mediante el método Stop&Go.

En este método, donde se simula una parada de 55 segundos ante un “semáforo”, se pueden destacar varios aspectos clave:

- El vehículo de gasolina (*Opel Grandland X*) que se ha utilizado en la medida es prácticamente de estreno y está equipado con un sistema de arranque y parada automático [Start-Stop]. El sistema apaga el motor cada vez que el vehículo se detiene, lo cual no solo contribuye a reducir las emisiones de dióxido de carbono y el consumo de combustible, sino también a disminuir significativamente la contaminación acústica [31]. Es por ello, que a velocidades tan bajas como las representadas en la Figura 29, los niveles de ruido del vehículo de gasolina pueden ser similares o incluso inferiores a los del VE. En el caso del VE, el sistema AVAS no se apaga durante la parada, lo que explica los niveles de ruido relativamente más altos en comparación con el vehículo de gasolina.
- El vehículo de diésel mientras está simulando la parada, es el único que está generando ruido debido al ralenti, ya que el motor permanece encendido aunque el vehículo no esté en movimiento. Esto provoca que el vehículo diésel sea el que genera mayor nivel de ruido en la gráfica comparativa. Este comportamiento es típico de los motores de combustión interna cuando no cuentan con sistemas de parada automática.

6.3. Conclusiones

El vehículo eléctrico cuando opera con el sistema AVAS activado, genera niveles de ruido inferiores en comparación con los vehículos de combustión interna, particularmente a bajas velocidades. No obstante, se observa que el AVAS hace que aumente el ruido en el rango de 10 a 20 km/h, alcanzando niveles equiparables a los de un vehículo de combustión interna, como el de gasolina en este estudio y menor que los niveles del vehículo diésel.

A pesar de este incremento, el nivel de ruido generado por los vehículos eléctricos con el AVAS activado no llega a exceder los límites establecidos para considerarse un problema de contaminación acústica. Según la Ordenanza de Protección contra la Contaminación Acústica y Térmica del 25 de febrero de 2011 [35] (véase la Tabla 32), el nivel máximo permitido en áreas residenciales es de 65 dB durante el día. Los datos obtenidos indican que sería necesario un número considerable de vehículos eléctricos con el AVAS encendido circulando a velocidades entre 10-20 km/h para sobrepasar dicho nivel. En general, estos vehículos generan menos ruido que los de combustión interna, lo cual es especialmente relevante en entornos urbanos, donde la reducción del ruido es más notable.

Además, el sistema AVAS demuestra ser efectivo para alertar a peatones y ciclistas. Al simular el sonido de un motor de combustión y activarse en situaciones de baja velocidad, donde este tipo de vehículos son prácticamente silenciosos, el AVAS mejora significativamente la seguridad vial al hacer más perceptible la presencia del vehículo, pudiendo reducir así la probabilidad de accidentes.

En resumen, el AVAS equilibra de manera efectiva la reducción de la contaminación acústica con la necesidad de garantizar la seguridad de otros usuarios de la vía.

Estos datos recopilados sobre los niveles de presión acústica de los vehículos eléctricos serán utilizados en los escenarios del **apartado 7**, donde se demuestra que el nivel de ruido emitido no es suficiente para que el sistema AVAS afecte negativamente a la población.

7. Resultados simulaciones de los diferentes escenarios y exposición al ruido

El procedimiento para evaluar los resultados se estructura de la siguiente manera:

Para cada escenario simulado, se adjuntan tablas que recogen el nivel de potencia sonora total generado por todos los vehículos que recorren dicho escenario. A continuación, se destaca el nivel de presión sonora máximo registrado por uno de los receptores situados en las fachadas de los edificios, con el fin de ofrecer una referencia sobre el impacto acústico máximo que podría percibirse en una vivienda concreta. También se proporciona el valor de la mediana, que representa el nivel mínimo de presión sonora considerado para el análisis de los receptores. Finalmente, se detalla la distribución de las personas expuestas a diferentes niveles de ruido según los datos captados por los receptores de fachada, indicando el porcentaje de población afectada en cada rango de exposición sonora.

Al final de cada subapartado **7.1** y **7.2** se realizan una serie de observaciones en las que se extraen conclusiones comparando los diferentes casos que han sido simulados entre sí.

7.1. Escenario de únicamente vehículos eléctricos

- **CASO 1.** 100% de VE a 10 y 20 km/h con AVAS y sin AVAS.

Tabla 5. Nivel de potencia sonora total del escenario 7.1 caso 1.

Vehículos	Velocidad (km/h)	Conteo de vehículos (Q_m) ¹	Nivel de potencia sonora generado por cada tipo de vehículo (dBA)	Nivel de potencia sonora total (dBA) ²
Eléctricos con AVAS	10	195	45,8	50,7
Eléctricos con AVAS	20	195	45,1	
Eléctricos sin AVAS	10	195	43,3	
Eléctricos sin AVAS	20	195	44,0	

Nivel máximo alcanzado por uno de los receptores: 36,9 dB.

Valor de la mediana: 16,9 dB.

Reparto de residentes de manera detallada: se encuentra en la Tabla 43 del Anexo **A.4.1** para el **CASO 1**.

¹ Hace referencia a la ecuación 2 del apartado 5.2.1., Q_m es el flujo de tráfico vehículos por hora de una categoría m .

² Hace referencia a la suma energética de las diferentes fuentes lineales de potencia, y, además, es el valor que se introduce en CadnaA para la evaluación del nivel de presión sonora captada por los receptores de fachada.

Tabla 6. Reparto de personas para cada grupo de nivel captado por los receptores de fachada. Escenario 7.1 caso 1.

Niveles [dBA]	Personas asignadas a diferentes grupos de receptores	Redondeo	Total
< 25	2456,0	2456	8200
25-30	1855,5	1856	
30-35	2546,1	2546	
> 35	1342,4	1342	

Tabla 7. Porcentaje de exposición al ruido para cada uno de los niveles. Escenario 7.1 caso 1.

Ld (dBA)	RODADO	<25	25-30	30-35	>35
Población expuesta	Habitantes	2456	1856	2546	1342
	%	30%	23%	31%	16%

➤ **CASO 2.** 100% de VE a 10 y 20 km/h sin AVAS.

Tabla 8. Nivel de potencia sonora total del escenario 7.1 caso 2.

Vehículos	Velocidad (km/h)	Conteo de vehículos (Q_m)	Nivel de potencia sonora generado por cada tipo de vehículo (dBA)	Nivel de potencia sonora total (dBA)
Eléctricos sin AVAS	10	390	46,3	49,7
Eléctricos sin AVAS	20	390	47,0	

Nivel máximo alcanzado por uno de los receptores: 35,9 dB.

Valor de la mediana: 15,9 dB

Reparto de residentes de manera detallada: se encuentra en la Tabla 44 del Anexo **A.4.1.** para el **CASO 2.**

Tabla 9. Reparto de personas para cada grupo de nivel captado por los receptores de fachada. Escenario 7.1 caso 2.

Niveles [dBA]	Personas asignadas a diferentes grupos de receptores	Redondeo	Total
< 25	2801,2	2801	8200
25-30	1935,0	1935	
30-35	3333,1	3333	
> 35	130,7	131	

Tabla 10. Porcentaje de exposición al ruido para cada uno de los niveles. Escenario 7.1 caso 2.

Ld (dBA)	RODADO	<25	25-30	30-35	>35
Población expuesta	Habitantes	2801	1935	3333	131
	%	34%	24%	41%	2%

➤ **CASO 3.** 100% de VE a 10 y 20 km/h con AVAS.

Tabla 11. Nivel de potencia sonora total del escenario 7.1 caso 3.

Vehículos	Velocidad (km/h)	Conteo de vehículos (Q_m)	Nivel de potencia sonora generado por cada tipo de vehículo (dBA)	Nivel de potencia sonora total (dBA)
Eléctricos con AVAS	10	390	48,8	51,5
Eléctricos con AVAS	20	390	48,1	

Nivel máximo alcanzado por uno de los receptores: 37,7 dB.

Valor de la mediana: 17,7 dB

Reparto de residentes de manera detallada: se encuentra en la Tabla 45 del Anexo **A.4.1.** para el **CASO 3.**

Tabla 12. Reparto de personas para cada grupo de nivel captado por los receptores de fachada. Escenario 7.1 caso 3.

Niveles [dBA]	Personas asignadas a diferentes grupos de receptores	Redondeo	Total
< 25	2207,8	2208	8200
25-30	1658,4	1658	
30-35	1696,0	1696	
> 35	2637,8	2638	

Tabla 13. Porcentaje de exposición al ruido para cada uno de los niveles. Escenario 7.1 caso 3.

Ld (dBA)	RODADO	<25	25-30	30-35	>35
Población expuesta	Habitantes	2208	1658	1696	2638
	%	27%	20%	21%	32%

Si se tiene en cuenta la comparación del **CASO 2** y el **CASO 3**, la diferencia de ruido del tráfico generada es ínfima, de 1,8 dB para ser exactos, siendo a priori una distinción minúscula para el oído humano.

Al examinar las tablas de porcentaje de exposición al ruido (Tabla 10 y Tabla 13) podemos contemplar que hay un cambio ligeramente considerable para el tanto por ciento de la población expuesta, incrementándose la exposición de ruido máxima en un 30% para valores mayores de 35 dB. Precisamente, serían 2507 personas expuestas a un mayor nivel cuando el escenario está formado por únicamente vehículos eléctricos con el AVAS encendido. Para un conjunto de vehículos eléctricos que lleven la mitad el AVAS encendido, y la otra apagado (**CASO 1**), desciende un 16% la exposición máxima (Tabla 7) con referencia al **CASO 3**.

No obstante, teniendo en cuenta la velocidad propuesta y el nivel de presión sonora alcanzado no supondrá ningún problema acústico para las personas que habiten en las viviendas de los alrededores. Sin embargo, lo que adquiere mayor relevancia es la señalización adecuada de su presencia que ayuda a garantizar la seguridad de los peatones.

7.2. Escenarios de vehículos eléctricos y de combustión a velocidad constante.

- **CASO 1.** VCI y VE a una velocidad constante de 30 km/h.

Tabla 14. Nivel de potencia sonora total del escenario 7.2 caso 1.

Nivel máximo	Vehículos	Velocidad (km/h)	Conteo de vehículos (Q_m)	Nivel de potencia sonora generado por cada tipo de vehículo (dBA)	Nivel de potencia sonora total (dBA)
	Eléctricos	30	247	49,2	76,4
Ligeros	30	247	69,5		
Motocicletas	30	247	71,9		
Pesados	30	39	72,9		

alcanzado por uno de los receptores: 62,6 dB.

Valor de la mediana: 42,6 dB

Reparto de residentes de manera detallada: se encuentra en la Tabla 46 del Anexo A.4.2. para el CASO 1.

Tabla 15. Reparto de personas para cada grupo de nivel captado por los receptores de fachada. Escenario 7.2 caso 1.

Niveles [dBA]	Personas asignadas a diferentes grupos de receptores	Redondeo	Total
< 50	2191,3	2191	8200
50-55	1644,8	1645	
55-60	1774,4	1774	
> 60	2589,5	2590	

Tabla 16. Porcentaje de exposición al ruido para cada uno de los niveles. Escenario 7.2 caso 1.

Ld (dBA)	RODADO	<50	50-55	55-60	>60
Población expuesta	Habitantes	2191	1645	1774	2590
	%	27%	20%	22%	32%

- **CASO 2.** 75% de VCI y VE a una velocidad de 30 km/h y 25% de VE a 10 y 20 km/h con AVAS y sin AVAS.

Tabla 17. Nivel de potencia sonora total del escenario 7.2 caso 2.

Vehículos	Velocidad (km/h)	Conteo de vehículos (Q_m)	Nivel de potencia sonora (dBA)	Nivel de potencia sonora total >20km/h Nivel de potencia sonora <20km/h (dBA)	Nivel de potencia sonora total (dBA)
Eléctricos	30	186	48,0	75,2	75,2
Ligeros	30	186	68,3		
Motocicletas	30	184	70,6		
Pesados	30	29	71,7		
Eléctricos con AVAS	10	49	39,8	44,7	
Eléctricos con AVAS	20	49	39,1		
Eléctricos sin AVAS	10	48	37,2		
Eléctricos sin AVAS	20	49	38,0		

Nivel máximo alcanzado por uno de los receptores: 61,4 dB.

Valor de la mediana: 41,4 dB

Reparto de residentes de manera detallada: se encuentra en la Tabla 47 del Anexo A.4.2. para el CASO 2.

Tabla 18. Reparto de personas para cada grupo de nivel captado por los receptores de fachada. Escenario 7.2 caso 2.

Niveles [dBA]	Personas asignadas a diferentes grupos de receptores	Redondeo	Total
< 50	2578,9	2579	8200
50-55	1923,2	1923	
55-60	3013,9	3014	
> 60	684,0	684	

Tabla 19. Porcentaje de exposición al ruido para cada uno de los niveles. Escenario 7.2 caso 2.

Ld (dBA)	RODADO	<50	50-55	55-60	>60
Población expuesta	Habitantes	2579	1923	3014	684
	%	31%	23%	37%	8%

➤ **CASO 3.** 50% de VCI y VE a una velocidad de 30 km/h y 50% de VE a 10 y 20 km/h con AVAS y sin AVAS.

Tabla 20. Nivel de potencia sonora total del escenario 7.2 caso 3.

Vehículos	Velocidad (km/h)	Conteo de vehículos (Q_m)	Nivel de potencia sonora (dBA)	Nivel de potencia sonora total >20km/h Nivel de potencia sonora <20km/h (dBA)	Nivel de potencia sonora total (dBA)
Eléctricos	30	125	46,3	73,4	73,4
Ligeros	30	123	66,5		
Motocicletas	30	123	68,8		
Pesados	30	19	69,8		
Eléctricos con AVAS	10	97	42,8	47,7	
Eléctricos con AVAS	20	97	42,0		
Eléctricos sin AVAS	10	97	40,3		
Eléctricos sin AVAS	20	99	41,1		

Nivel máximo alcanzado por uno de los receptores: 59,6 dB.

Valor de la mediana: 39,6 dB

Reparto de residentes de manera detallada: se encuentra en la Tabla 48 del Anexo **A.4.2.** para el **CASO 3.**

Tabla 21. Reparto de personas para cada grupo de nivel captado por los receptores de fachada. Escenario 7.2 caso 3.

Niveles [dBA]	Personas asignadas a diferentes grupos de receptores	Redondeo	Total
< 50	2903,6	2904	8200
50-55	2071,9	2072	
55-60	3224,5	3224	
> 60	0,0	0	

Tabla 22. Porcentaje de exposición al ruido para cada uno de los niveles. Escenario 7.2 caso 3.

Ld (dBA)	RODADO	<50	50-55	55-60	>60
Población expuesta	Habitantes	2904	2072	3224	0
	%	35%	25%	39%	0%

Como se puede ver en la Tabla 22, no se registra ningún valor por encima de los 60 dB, por tanto, se reducirán los rangos para niveles de presión sonora inferiores en el siguiente **CASO.**

- **CASO 4.** 25% de VCI y VE a una velocidad de 30 km/h y 75% de VE a 10 y 20 km/h con AVAS y sin AVAS.

Tabla 23. Nivel de potencia sonora total del escenario 7.2 caso 4.

Vehículos	Velocidad (km/h)	Conteo de vehículos (Q_m)	Nivel de potencia sonora (dBA)	Nivel de potencia sonora total >20 km/h Nivel de potencia sonora total <20 km/h (dBA)	Nivel de potencia sonora total (dBA)
Eléctricos	30	62	43,2	70,3	70,3
Ligeros	30	62	63,5		
Motocicletas	30	62	65,9		
Pesados	30	9	66,6		
Eléctricos con AVAS	10	147	44,6	49,4	
Eléctricos con AVAS	20	146	43,9		
Eléctricos sin AVAS	10	146	42,0		
Eléctricos sin AVAS	20	146	42,8		

Nivel máximo alcanzado por uno de los receptores: 56,5 dB.

Valor de la mediana: 36,5 dB

Reparto de residentes de manera detallada: se encuentra en la Tabla 49 del Anexo **A.4.2.** para el **CASO 4.**

Tabla 24. Reparto de personas para cada grupo de nivel captado por los receptores de fachada. Escenario 7.2 caso 4.

Niveles [dBA]	Personas asignadas a diferentes grupos de receptores	Redondeo	Total
< 45	2558,7	2559	8200
45-50	1948,7	1949	
50-55	3011,5	3011	
> 55	681,2	681	

Tabla 25. Porcentaje de exposición al ruido para cada uno de los niveles. Escenario 7.2 caso 4.

Ld (dBA)	RODADO	<45	45-50	50-55	>55
Población expuesta	Habitantes	2559	1949	3011	681
	%	31%	24%	37%	8%

➤ **CASO 5.** 100% de VE a 10 y 20 km/h con AVAS y sin AVAS.

Es el mismo escenario y con los mismos resultados que para el caso 1 del Escenario A.

Conociendo los 5 primeros **CASOS** sacamos en claro las siguientes conclusiones:

- Máximo nivel de presión sonora alcanzado por uno de los receptores y que podría afectar a un grupo de personas.

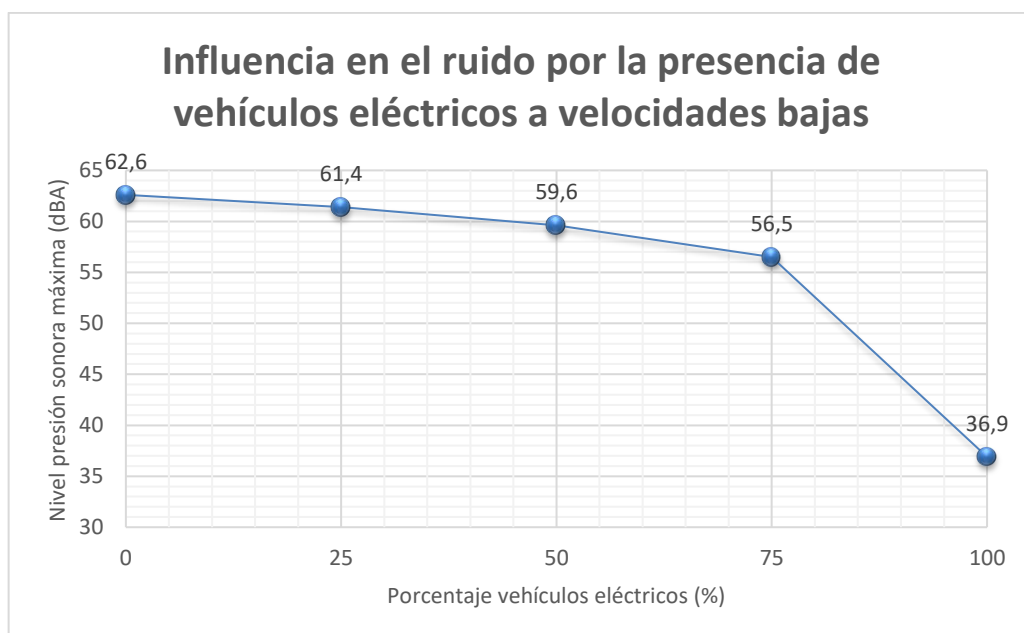


Figura 30. Gráfica resultante de la influencia de los vehículos eléctricos con respecto al nivel de presión sonora máximo ejercido a los ciudadanos.

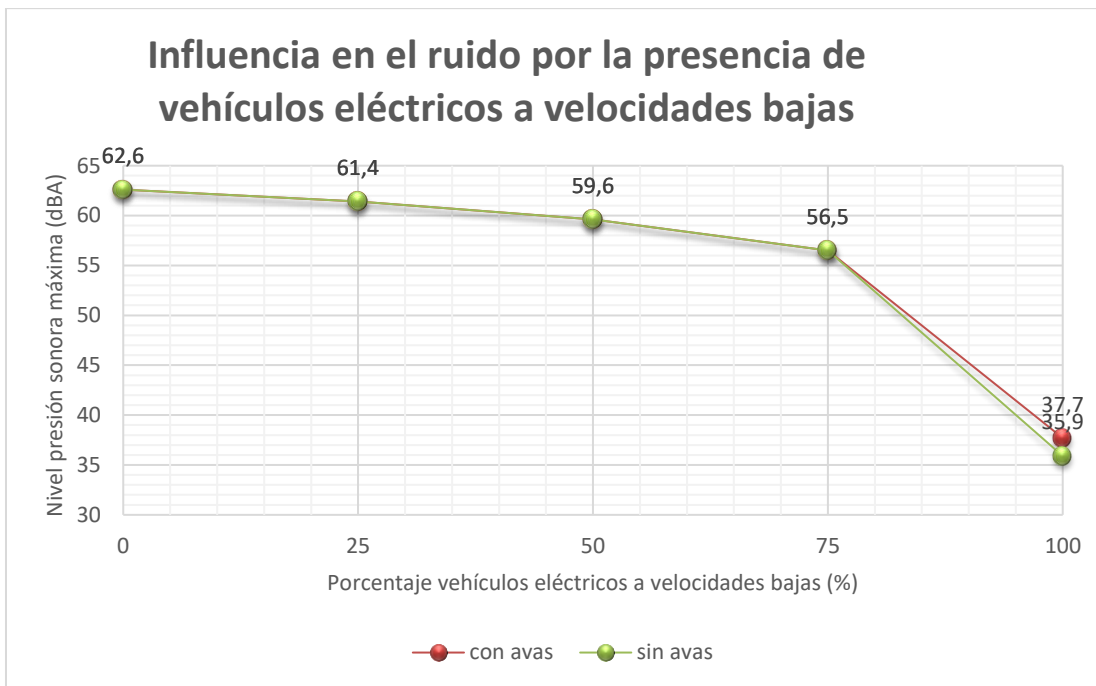


Figura 31. Gráfica resultante de la influencia de los vehículos eléctricos con AVAS o sin AVAS por separado con respecto al nivel de presión sonora máximo ejercido a los ciudadanos.

Tal como se menciona al final del apartado 7.1., la diferencia de SPL máxima alcanzada por algunos de los receptores de fachada es de 1,8 dBA al comparar las simulaciones realizadas con vehículos eléctricos que tienen el sistema AVAS activado frente a aquellas en las que no está activado.

- Porcentaje de personas expuestas al ruido

Debido a que el sistema AVAS no puede generar un ruido que ocasione una molestia acústica a las personas que habitan en las viviendas de los alrededores, se ha considerado que el “ruido” que genera el 100% de los VE (**CASO 5**), es aquel que es mayor de 35 dB. Para ello, se ha analizado el número de receptores en fachada menor de 35 dB para todos los diferentes **CASOS** anteriores.

Partiendo de esta base se ha desarrollado la siguiente gráfica:

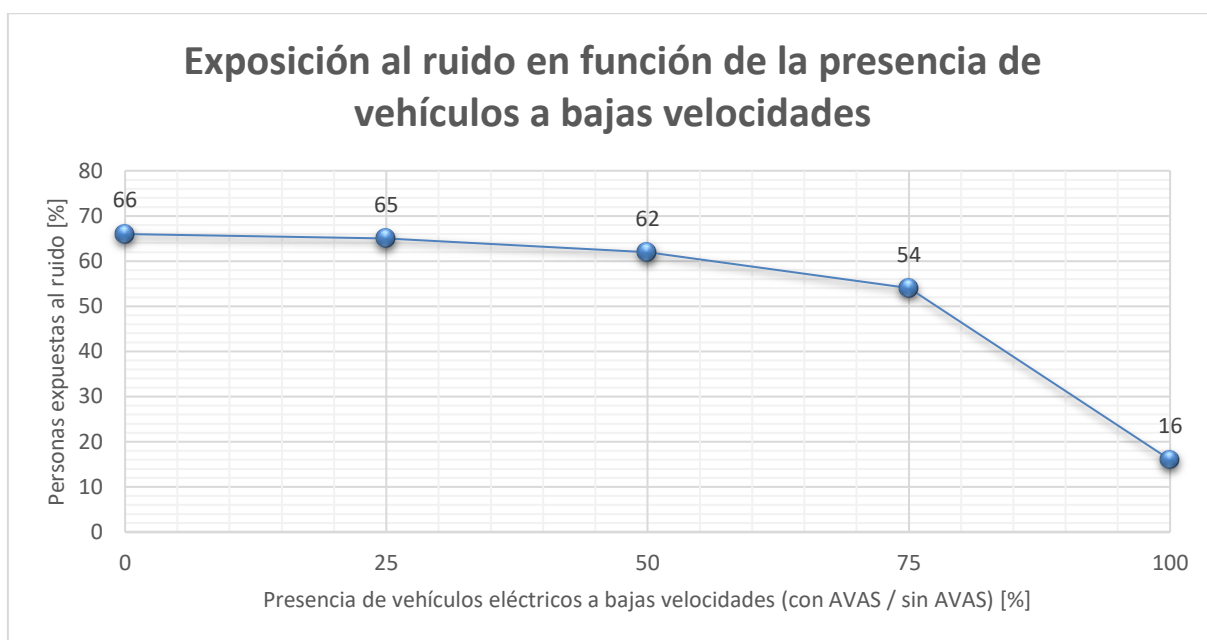


Figura 32. Gráfica que muestra el porcentaje de personas expuestas al ruido en función de la presencia de VE con AVAS y sin AVAS activado.

En un escenario sin presencia de vehículos eléctricos (0% en la gráfica anterior), el 66% de las personas están expuestas al ruido, lo que implica que el 34% se encuentra expuesto a niveles de sonido menores a 35 dB, nivel considerado en este estudio como “ruido”. Esto sugiere que la exposición al ruido es significativa en ausencia de vehículos eléctricos.

A medida que la presencia de vehículos eléctricos (VE) en el tráfico aumenta, el porcentaje de personas expuestas al ruido disminuye progresivamente, alcanzando solo un 16% cuando la presencia de VE es del 100%. Esta reducción se debe a que los vehículos eléctricos son intrínsecamente más silenciosos comparados con los vehículos de combustión interna (VCI), y su integración en el tráfico reduce considerablemente el nivel de presión sonora general en las áreas urbanas.

Además, el descenso en la exposición al ruido se puede atribuir no solo a la menor emisión sonora de los VE, sino también a la reducción del número de VCI en los escenarios evaluados. La reducción en la exposición al ruido con la incorporación de vehículos eléctricos es particularmente notable cuando se pasa de un escenario con baja presencia de VE a uno con una alta proporción de estos, lo que confirma su potencial para mitigar la contaminación acústica en entornos urbanos.

A continuación, se presentan dos escenarios adicionales que aportan conclusiones relevantes en cuanto a la exposición al ruido. Estos escenarios se centran en evaluar el impacto acústico en situaciones específicas, considerando la creciente incorporación de VE y las condiciones de tráfico a bajas velocidades.

➤ **CASO ELÉCTRICOS**

Se explora un escenario donde la flota de vehículos está compuesta exclusivamente por VE. Este caso permite analizar la reducción de la exposición al ruido en un contexto donde la tecnología de propulsión eléctrica predomina, lo cual se proyecta como una realidad futura.

Tabla 26. Nivel de potencia sonora total del escenario 7.2 caso eléctricos.

Vehículos	Velocidad (km/h)	Conteo de vehículos (Q_m)	Nivel de potencia sonora (dBA)	Nivel de potencia sonora total (dBA)
Eléctricos	30	130	46,5	56,9
Eléctricos	40	130	51,3	
Eléctricos	50	130	54,0	
Eléctricos con AVAS	10	97	42,8	
Eléctricos con AVAS	20	97	42,0	
Eléctricos sin AVAS	10	97	40,3	
Eléctricos sin AVAS	20	99	41,1	

Nivel máximo alcanzado por uno de los receptores: 43,1 dB.

Valor de la mediana: 23,1 dB

Reparto de residentes de manera detallada: se encuentra en la Tabla 50 del Anexo **A.4.2.** para el **CASO ELÉCTRICOS.**

Tabla 27. Reparto de personas para cada grupo de nivel captado por los receptores de fachada. Escenario 7.2 caso eléctricos.

Niveles [dBA]	Personas asignadas a diferentes grupos de receptores	Redondeo	Total
< 30	2036,5	2037	8200
30-35	1738,3	1738	
35-40	1713,3	1713	
> 40	2712,0	2712	

Tabla 28. Porcentaje de exposición al ruido para cada uno de los niveles. Escenario 7.2 caso eléctricos.

Ld (dBA)	RODADO	<30	30-35	35-40	>40
Población expuesta	Habitantes	2037	1738	1713	2712
	%	25%	21%	21%	33%

A partir de los resultados obtenidos en este caso, se puede concluir que la transición hacia una flota de vehículos predominantemente eléctricos no solo es viable desde el punto de vista de la reducción de emisiones de gases contaminantes, sino que también constituye una estrategia clave para mitigar la contaminación acústica en entornos urbanos. El **CASO** muestra

de forma clara que la adopción generalizada de vehículos eléctricos reduciría la exposición al ruido de los ciudadanos, mejorando por tanto la calidad de vida en áreas densamente pobladas.

➤ CASO BAJA VELOCIDAD

A pesar de que la velocidad es un factor crucial en la generación de ruido, en este caso se examina como los VE y los VCI influyen en el nivel de presión sonora cuando se limitan a bajas velocidades. Este análisis es fundamental para entender el comportamiento acústico en zonas urbanas con restricciones de velocidad.

Tabla 29. Nivel de potencia sonora total del escenario 7.2 caso baja velocidad.

Vehículos	Velocidad (km/h)	Conteo de vehículos (Q_m)	Nivel de potencia sonora (dBA)	Nivel de potencia sonora total VCI Nivel de potencia sonora total VE (dBA)	Nivel de potencia sonora total (dBA)
Ligeros	10	94	65,0	74,7	74,7
Ligeros	20	95	64,2		
Motocicletas	10	94	69,1		
Motocicletas	20	95	67,8		
Pesados	10	6	67,7		
Pesados	20	6	65,5		
Eléctricos con AVAS	10	97	42,8	47,7	
Eléctricos con AVAS	20	97	42,1		
Eléctricos sin AVAS	10	97	40,3		
Eléctricos sin AVAS	20	99	41,0		

Nivel máximo alcanzado por uno de los receptores: 60,9 dB.

Valor de la mediana: 40,9 dB

Reparto de residentes de manera detallada: se encuentra en la Tabla 51 del Anexo **A.4.2.** para el **CASO BAJA VELOCIDAD.**

Tabla 30. Reparto de personas para cada grupo de nivel captado por los receptores de fachada. Escenario 7.2 caso baja velocidad.

Niveles [dBA]	Personas asignadas a diferentes grupos de receptores	Redondeo	Total
< 50	2800,0	2800	8200
50-55	1971,5	1972	
55-60	3151,4	3151	
> 60	277,0	277	

Tabla 31. Porcentaje de exposición al ruido para cada uno de los niveles. Escenario 7.2 caso baja velocidad.

Ld (dBA)	RODADO	<50	50-55	55-60	>60
Población expuesta	Habitantes	2800	1972	3151	277
	%	34%	24%	38%	3%

Este segundo caso adicional es muy similar al **CASO 2**, se observa que, incluso en condiciones donde la velocidad de los vehículos es reducida, los VCI continúan generando niveles de presión sonora considerablemente más altos que los VE. Esto se debe principalmente al ruido de propulsión, que en los VCI permanece significativo, aun cuando la velocidad no es un factor determinante. Como se muestra en la Tabla 29, el nivel de ruido producido por los VCI domina el ambiente acústico, absorbiendo el efecto beneficioso de la menor sonoridad de los VE.

Esta conclusión pone de manifiesto que, si bien la reducción de velocidad es una estrategia efectiva para disminuir el ruido en zonas urbanas, su impacto es limitado si existe una alta proporción de VCI. Por lo tanto, para alcanzar una reducción notable en la contaminación acústica, es necesario combinar las políticas de limitación de velocidad con un incremento en la adopción de vehículos eléctricos. De esta manera, se lograría un entorno acústico más favorable, mitigando el ruido y beneficiando a la población expuesta al tráfico urbano.

Conclusión

En primer lugar, es importante considerar los niveles de ruido en zonas de uso residencial según las normativas vigentes en Madrid. De acuerdo con la Ordenanza de Protección contra la Contaminación Acústica y Térmica del 25 de febrero de 2011 [35], el nivel máximo permitido para un área de uso residencial es de 65 dB durante el día (L_d), tal como se muestra en la tabla de objetivos de calidad acústica. Puede verse representada en la segunda fila (**a, II**) de la tabla.

Tabla 32. Tablas de objetivos de calidad acústica para ruido para áreas urbanizadas existentes.

Tipo de Área Acústica		Índices de ruido		
		L_d	L_e	L_n
e	I	60	60	50
a	II	65	65	55
d	III	70	70	65
c	IV	73	73	63
b	V	75	75	65
f	VI	-	-	-

En el caso específico de la calle Princesa, una de las calles más transitadas de la ciudad de Madrid, los escenarios simulados indican que la mayoría de los niveles de ruido superan este límite.

Es relevante destacar que, hasta que no se alcanza un escenario compuesto en su totalidad por vehículos eléctricos, los niveles de ruido continúan excediendo los límites establecidos. Esto se debe a que los vehículos de combustión interna, presentes en los escenarios mixtos, emiten un nivel de ruido que “solapa” el ruido considerablemente menor generado por los vehículos eléctricos tanto en altas como en bajas velocidades, lo que hace que el beneficio acústico de estos últimos sea insignificante en la reducción del nivel de presión sonora total.

En segundo lugar, los vehículos eléctricos, incluso con el sistema AVAS activado, generan niveles de ruido apreciablemente inferiores a los de los vehículos de combustión interna, especialmente a velocidades iguales o inferiores a 20 km/h. En estos casos, el nivel de ruido emitido por los vehículos eléctricos no supera los 65 dB, lo que técnicamente no se consideraría como “ruido” según la normativa, ya que este término se reserva para sonidos por encima de dicho umbral. Por lo tanto, estos vehículos no solo son más silenciosos, sino que también contribuyen a un entorno acústico más favorable en áreas residenciales y otras zonas urbanas sensibles.

También, es conveniente subrayar que la implementación del sistema AVAS no incrementa de forma radical el nivel de presión sonora con respecto al nivel que presentaban los vehículos

eléctricos de inicio. Aunque el AVAS introduce un sonido adicional para mejorar la seguridad, especialmente para ciclistas, peatones y otros usuarios vulnerables de la vía, este incremento en el ruido es relativamente pequeño y no afecta de manera sustancial a la calidad acústica del entorno. Por lo tanto, el AVAS se presenta como una solución efectiva que equilibra la necesidad de alertar a otros usuarios de la vía sin contribuir de manera significativa a la contaminación acústica.

Finalmente, la adopción progresiva y creciente de vehículos eléctricos representa un paso crucial hacia una movilidad más sostenible, que no solo reduce la contaminación acústica, sino que también disminuye las emisiones de gases contaminantes, contribuyendo así a la mejora de la salud pública y la calidad de vida de los ciudadanos. La transición hacia un futuro mayoritariamente eléctrico es, por tanto, una estrategia clave para alcanzar los objetivos de sostenibilidad urbana y protección del medio ambiente en Madrid y otras ciudades con desafíos similares.

Referencias

- [1] España, Ministerio de la Presidencia, “Real Decreto n.º 1513/2005, Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental”, Boletín Oficial del Estado, n.º 301, 17 de diciembre de 2005. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2005-20792>
- [2] Iberdrola. “La contaminación acústica, ¿cómo reducir el impacto de una amenaza invisible?” Iberdrola. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/que-es-contaminacion-acustica-causas-efectos-soluciones>
- [3] “Quiet Vehicle Sounder - Brigade Electronics”. Brigade Electronics. Accedido el 4 de julio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://brigade-electronics.com/es/sistemas-de-alerta/quiet-vehicle-sounder/>
- [4] “10 consejos para reducir la contaminación acústica en tu ciudad”. Ecología Digital. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://ecologiadigital.bio/como-podemos-reducir-la-contaminacion-acustica-en-nuestras-ciudades/>
- [5] “Noticias Jurídicas”. Noticias Jurídicas. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: https://noticias.juridicas.com/base_datos/Admin/530171-regl-540-2014-ue-de-16-abr-nivel-sonoro-de-los-vehiculos-de-motor-y-de.html
- [6] “Así es el sistema avas obligatorio en los coches eléctricos | RACE”. RACE. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.race.es/avisador-acustico-coches-electricos>
- [7] “Toyota le pone ruido al Prius | Seguridad | Motor | elmundo.es”. EL MUNDO - Diario online líder de información en español. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.elmundo.es/elmundomotor/2010/08/24/seguridad/1282652167.html>
- [8] “La utilización del sistema AVAS en vehículos eléctricos.” Renting de Coches | Todos los vehículos de renting - Vamos. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.vamos.es/noticias-coches/el-sistema-avas-para-vehiculos-electricos-pasa-a-ser-obligatorio>
- [9] “What are the key benefits of electric motors over combustion motors?” Fisher & Paykel Technologies. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.fisherpaykeltechnologies.com/knowledge-hub/what-are-the-key-benefits-of-electric-motors-over-combustion-motors? x tr sl=en& x tr tl=es& x tr hl=es& x tr pto=rq>
- [10] “Facilitar la transición hacia el transporte eléctrico por carretera”. CORDIS | European Commission. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible:

<https://cordis.europa.eu/article/id/443730-enabling-a-successful-transition-towards-electric-powered-road-transport/es>

[11] “El Pacto Verde Europeo”. Comisión Europea. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es

[12] “Cumplir el Pacto Verde Europeo”. Comisión Europea. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_es

[13] “Pros y contras de un coche eléctrico | Global Mobility Call”. IFEMA MADRID: Eventos, Ferias y Congresos | IFEMA MADRID. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.ifema.es/global-mobility-call/noticias-sector/ventajas-y-desventajas-de-los-coches-electricos>

[14] “El coche eléctrico - Rincón educativo”. Rincón educativo. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://rinconeducativo.org/es/recursos-educativos/el-coche-electrico/>

[15] “Seis ventajas y cuatro inconvenientes de los autobuses eléctricos - Movilidad Eléctrica”. Movilidad Eléctrica. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://movilidadelectrica.com/seis-ventajas-y-cuatro-inconvenientes-de-los-autobuses-electricos/>

[16] “Opel Mokka-e BEV 50kWh GS-e - Opel Vitoria Videinsa”. Opel Vitoria Videinsa. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://opelvitoria.es/coche/opel-mokka-e-bev-50kwh-gs-e-7/>

[17] “7820 Evaluator - 7821 Evaluator Light | Brüel & Kjær”. B&K | Sound and Vibration Measurement | Brüel & Kjær. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.bksv.com/es/services/downloads/environmental-software/782x-evaluator>

[18] Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU). Joint Research Centre. JRC Reference Reports. European Commission, 2012.

[19] Orden PCI/1319/2018, de 7 de diciembre, por la que se modifica el Anexo II del Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del ruido, en lo referente a la evaluación del ruido ambiental.

[20] Guía para Terminología de Medición de Ruido. Cirrus Research S.L.

[21] “Line Source”. Strutt. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://strutt.arup.com/help/Propagation/LineAtten.htm>

- [22] “¿Qué es ArcGIS? | ArcGIS Resource Center”. ArcGIS Resource Center. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
- [23] “¿Qué son los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y cómo funcionan? - Ingeoexpert”. Ingeoexpert. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://ingeoexpert.com/articulo/que-son-los-sistemas-de-informacion-geografica-sig-y-como-funcionan/>
- [24] “Herramientas SIG para la elaboración de un mapa de ruido”. Acústica ambiental. Universidad Politécnica de Madrid.
- [25] “Un recorrido rápido por ArcCatalog—ArcMap | Documentación”. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/get-started/introduction/a-quick-tour-of-arccatalog.htm>
- [26] “Extensiones de archivo de shapefile—ArcMap | Documentación”. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/shapefiles/shapefile-file-extensions.htm>
- [27] “Sound of Numbers - CadnaA”. Sound of Numbers - Inicio. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.acousticware.com/index.php/es/productos/software-es/cadnaa-es>
- [28] “Understanding the Intake vs. Exhaust Fan | Metallic Products Blog”. Metallic. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www-mpvent.com.translate.google/intake-vs-exhaust-fan/? x tr sl=en& x tr tl=es& x tr hl=es& x tr pto=rq>
- [29] Dr. R. Barti, “EL VEHICULO ELECTRICO Y LA REDUCCION DEL RUIDO AMBIENTE EN CIUDADES”.
- [30] J. Calvo Ramos, J. San Román García, C. Álvarez Caldas y A. Quesada, “Influencia de los Parámetros de Conducción en el Ruido Emitido por un Automóvil en el Tráfico Urbano”. Madrid.
- [31] “¿Cómo se desactiva el sistema de parada y arranque (Start-Stop) en el Opel Grandland X? - DailyDriven”. Servicii si informatii auto de la A la Z - DailyDriven. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://dailydriven.ro/es/como-se-desactiva-el-sistema-de-parada-y-arranque-start-stop-en-el-opel-grandland-x>
- [32] R. Sánchez y A. Plaza. “El mapa de las alturas de todos los edificios de España: busca tu barrio”. elDiario.es. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: https://www.eldiario.es/economia/mapa-alturas-edificios-catastro-vertical-urbanismo-espana-vive-pisos-casas_1_8331375.html

[33] “Sede Electrónica del Catastro - Fondo mapa de España”. Sede Electrónica del Catastro - Inicio. Accedido el 30 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: [https://www1.sedecatastro.gob.es/Cartografia/mapa.aspx?pest=urbana&from=OVCBusqueda&ZV=NO&ZR=NO&anyoZV=&tematicos=&anyotem=&RCCompleta=&via=PRINCESA&tipoVia=CL&numero=&kilometro=&bloque=&escalera=&planta=&puerta=&DescProv=MADRID&prov=28&muni=900&DescMuni=MADRID&TipUR=U&codvia=4939&comVia=PRINCESA%20\(CALLE\)&tc=U&del=28&mun=900](https://www1.sedecatastro.gob.es/Cartografia/mapa.aspx?pest=urbana&from=OVCBusqueda&ZV=NO&ZR=NO&anyoZV=&tematicos=&anyotem=&RCCompleta=&via=PRINCESA&tipoVia=CL&numero=&kilometro=&bloque=&escalera=&planta=&puerta=&DescProv=MADRID&prov=28&muni=900&DescMuni=MADRID&TipUR=U&codvia=4939&comVia=PRINCESA%20(CALLE)&tc=U&del=28&mun=900)

[34] Censos de Población y Viviendas 2021. Resultados sobre Hogares y Viviendas. Instituto Nacional de Estadística.

[35] Ordenanza de Protección contra la Contaminación Acústica y Térmica, de 25 de febrero de 2011.

Anexo

A.1 Tablas de coeficientes para la potencia acústica de los vehículos de carretera

Tabla 33. Coeficientes para los vehículos $m = 1$ (vehículos ligeros).

Octave band centre frequency (Hz)	A_R	B_R	A_P	B_P	a	b
63	79.7	30.0	94.5	-1.3	0	0
125	85.7	41.5	89.2	7.2	0	0
250	84.5	38.9	88.0	7.7	0	0
500	90.2	25.7	85.9	8.0	2.6	-3.1
1000	97.3	32.5	84.2	8.0	2.9	-6.4
2000	93.9	37.2	86.9	8.0	1.5	-14
4000	84.1	39.0	83.3	8.0	2.3	-22.4
8000	74.3	40.0	76.1	8.0	9.2	-11.4

Tabla 34. Coeficientes para los vehículos $m = 3$ (vehículos pesados).

Octave band centre frequency (Hz)	A_R	B_R	A_P	B_P
63	87.0	30.0	104.4	0.0
125	91.7	33.5	100.6	3.0
250	94.1	31.3	101.7	4.6
500	100.7	25.4	101.0	5.0
1000	100.8	31.8	100.1	5.0
2000	94.3	37.1	95.9	5.0
4000	87.1	38.6	91.3	5.0
8000	82.5	40.6	85.3	5.0

Tabla 35. Coeficientes para los vehículos $m = 4b$ (motocicletas).

Octave band centre frequency (Hz)	A_R	B_R	A_P	B_P
63	0.0	0.0	95.0	3.2
125	0.0	0.0	97.2	5.9
250	0.0	0.0	92.7	11.9
500	0.0	0.0	92.9	11.6
1000	0.0	0.0	94.7	11.5
2000	0.0	0.0	93.2	12.6
4000	0.0	0.0	90.1	11.1
8000	0.0	0.0	86.5	12.0

A.2 Resultados de la medición de vehículos en función de la frecuencia

Vehículo eléctrico

✓ Método Pass-By

Tabla 36. Nivel de presión sonora medio (SPL) ejercida por el vehículo eléctrico en función de la frecuencia medido mediante el método Pass-By.

Frecuencia [Hz]	Velocidad				
	10 km/h	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h
	SPL [dBA]	SPL [dBA]	SPL [dBA]	SPL [dBA]	SPL [dBA]
100	45,4	48,6	52,4	53,8	55,5
125	43,0	46,7	50,4	54,0	55,6
160	42,7	46,6	50,5	55,0	57,7
200	42,8	46,3	51,2	55,2	58,5
250	43,9	46,5	50,8	55,4	57,9
315	45,3	47,6	49,4	52,9	56,2
400	45,9	45,3	47,0	50,8	54,6
500	42,4	44,1	47,6	52,6	56,2
630	40,0	43,2	48,8	54,1	57,8
800	43,4	45,2	50,4	56,0	59,6
1000	44,5	46,3	51,1	56,4	59,4
1250	43,5	45,4	47,4	51,6	54,8
1600	41,8	42,5	44,7	49,5	52,1
2000	38,8	40,4	43,0	47,0	49,6
2500	36,8	38,0	40,9	44,5	46,8
3150	35,6	36,1	38,8	42,3	44,2
4000	34,7	34,5	37,0	39,7	41,0
5000	32,7	33,2	35,6	38,2	39,4

✓ **Método Stop&Go**

Tabla 37. Nivel de presión sonora (SPL) ejercido por el vehículo eléctrico en función de la frecuencia medido mediante el método Stop&Go.

Frecuencia [Hz]	Velocidad				
	10 km/h	15 km/h	20 km/h	25 km/h	30 km/h
	SPL [dB]	SPL [dB]	SPL [dB]	SPL [dB]	SPL [dB]
100	42,5	41,1	43,2	43,4	44,0
125	42,3	40,8	42,9	43,8	43,8
160	43,2	42,3	45,5	47,0	44,2
200	43,2	42,2	45,7	46,6	45,6
250	45,7	43,3	46,8	47,5	46,7
315	44,4	42,5	44,6	46,8	44,1
400	45,1	41,7	42,2	46,8	47,7
500	45,6	42,9	42,9	49,7	48,0
630	41,6	42,8	42,5	46,8	51,8
800	43,1	42,4	46,0	46,1	48,0
1000	44,5	44,2	47,6	46,3	48,0
1250	42,7	42,1	44,9	43,6	46,1
1600	41,2	40,5	43,4	42,9	44,9
2000	38,4	38,3	40,7	40,9	40,9
2500	37,3	38,5	39,8	40,2	40,8
3150	35,0	35,9	37,3	40,4	39,0
4000	34,5	35,5	35,7	39,8	38,2
5000	32,0	32,8	34,2	37,6	35,8

Vehículo de gasolina

✓ Método Pass-By

Tabla 38. Nivel de presión sonora media ejercida por el vehículo de gasolina en función de la frecuencia medido mediante el método Pass-By.

Frecuencia [Hz]	Velocidad				
	10 km/h	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h
	SPL [dBA]	SPL [dBA]	SPL [dBA]	SPL [dBA]	SPL [dBA]
100	43,9	48,9	52,2	54,7	56,8
125	39,8	45,9	50,4	52,9	56,1
160	39,2	45,1	50,7	54,3	57,3
200	41,8	46,7	52,2	55,8	59,2
250	41,1	46,5	52,2	55,5	58,8
315	38,9	44,8	50,5	54,6	57,9
400	38,9	43,8	47,9	52,7	56,0
500	42,7	48,1	48,7	53,5	57,0
630	39,3	43,9	50,0	55,4	59,2
800	41,8	46,4	52,5	58,0	62,0
1000	42,8	48,0	53,5	59,0	63,1
1250	41,4	45,4	50,1	55,1	58,9
1600	41,4	44,3	48,7	53,3	57,0
2000	40,9	42,6	46,1	50,1	53,6
2500	39,3	41,2	44,2	47,3	50,7
3150	38,1	39,6	42,5	45,0	48,0
4000	36,2	37,1	40,3	42,4	44,8
5000	35,3	35,9	39,3	41,0	43,3

✓ **Método Stop&Go**

Tabla 39. Nivel de presión sonora ejercido por el vehículo de gasolina en función de la frecuencia medido mediante el método Stop&Go.

Frecuencia [Hz]	Velocidad				
	10 km/h	15 km/h	20 km/h	25 km/h	30 km/h
	SPL [dBA]	SPL [dBA]	SPL [dBA]	SPL [dBA]	SPL [dBA]
100	45,4	46,5	45,6	50,4	52,0
125	41,7	44,2	47,1	49,0	49,2
160	42,1	44,2	46,4	46,8	47,8
200	45,3	47,3	48,8	48,7	47,6
250	46,3	47,6	48,5	48,5	47,4
315	41,6	43,6	45,5	44,4	43,3
400	40,4	41,9	43,3	43,6	42,7
500	42,2	43,6	44,9	45,7	43,4
630	39,4	42,9	43,5	43,2	42,5
800	40,1	44,2	43,5	43,2	43,5
1000	41,0	43,8	43,9	44,1	44,1
1250	39,0	42,9	41,9	42,5	42,2
1600	37,9	41,8	41,2	40,4	40,4
2000	37,6	40,4	41,1	39,2	39,0
2500	36,2	39,5	39,4	37,5	36,9
3150	35,5	37,9	38,2	37,2	36,0
4000	33,7	35,9	37,3	35,3	33,9
5000	31,9	34,4	34,1	33,1	32,4

Vehículo de diésel

✓ Método Pass-By

Tabla 40. Nivel de presión sonora ejercida por el vehículo de diésel en función de la frecuencia medido mediante el método Pass-By.

Frecuencia [Hz]	Velocidad				
	10 km/h	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h
	SPL [dBA]	SPL [dBA]	SPL [dBA]	SPL [dBA]	SPL [dBA]
100	49,9	52,3	60,6	57,8	55,3
125	50,1	56,3	57,8	53,0	53,4
160	49,4	56,3	56,2	52,7	53,5
200	51,0	57,4	59,8	53,3	55,4
250	47,9	52,8	56,4	54,2	55,8
315	44,8	48,4	52,8	52,5	55,0
400	44,1	46,0	49,5	49,8	51,7
500	48,5	49,8	54,8	53,2	54,7
630	46,9	48,3	53,3	53,1	55,3
800	47,0	49,0	53,6	54,3	57,1
1000	46,3	48,1	53,9	55,7	58,4
1250	46,2	48,3	52,9	54,2	56,6
1600	44,8	46,3	50,9	52,2	54,1
2000	42,9	44,3	49,7	49,2	51,2
2500	39,9	41,2	46,4	46,3	48,5
3150	38,9	39,6	44,4	44,3	46,0
4000	38,0	37,8	42,9	41,6	43,2
5000	35,7	35,3	40,2	39,1	40,8

✓ Método Stop&Go

Tabla 41. Nivel de presión sonora ejercido por el vehículo de diésel en función de la frecuencia medido mediante el método Stop&Go.

Frecuencia [Hz]	Velocidad				
	10 km/h	15 km/h	20 km/h	25 km/h	30 km/h
	SPL [dBA]	SPL [dBA]	SPL [dBA]	SPL [dBA]	SPL [dBA]
100	52,7	52,5	53,2	53,7	51,5
125	51,7	53,2	50,9	50,7	52,4
160	49,3	48,8	48,3	48,2	48,9
200	50,0	50,2	50,3	51,0	49,7
250	48,6	49,3	48,7	48,1	48,4
315	46,9	46,6	47,4	47,8	47,0
400	42,2	41,7	43,8	44,4	43,8
500	46,8	47,5	49,1	49,3	48,0
630	46,4	47,2	48,3	47,9	47,6
800	44,4	45,7	46,6	46,3	46,8
1000	44,4	44,5	46,4	46,6	46,3
1250	44,8	44,8	46,6	46,8	46,5
1600	43,3	42,6	44,4	44,8	44,9
2000	42,3	43,5	44,7	44,7	45,2
2500	38,1	38,4	40,9	41,7	41,3
3150	37,0	36,8	39,5	40,5	39,9
4000	38,0	37,5	40,8	40,5	40,6
5000	33,8	33,4	35,6	35,8	36,1

A.3 Cálculo de las personas expuestas al ruido

El procedimiento que se ha desempeñado ha sido el siguiente. Se toma como ejemplo el **CASO 1** del apartado 7.2. **Escenarios de vehículos eléctricos y de combustión a velocidad constante**, siendo el escenario donde se genera mayor nivel de presión sonora.

La simulación inicial de este escenario tiene el siguiente resultado:

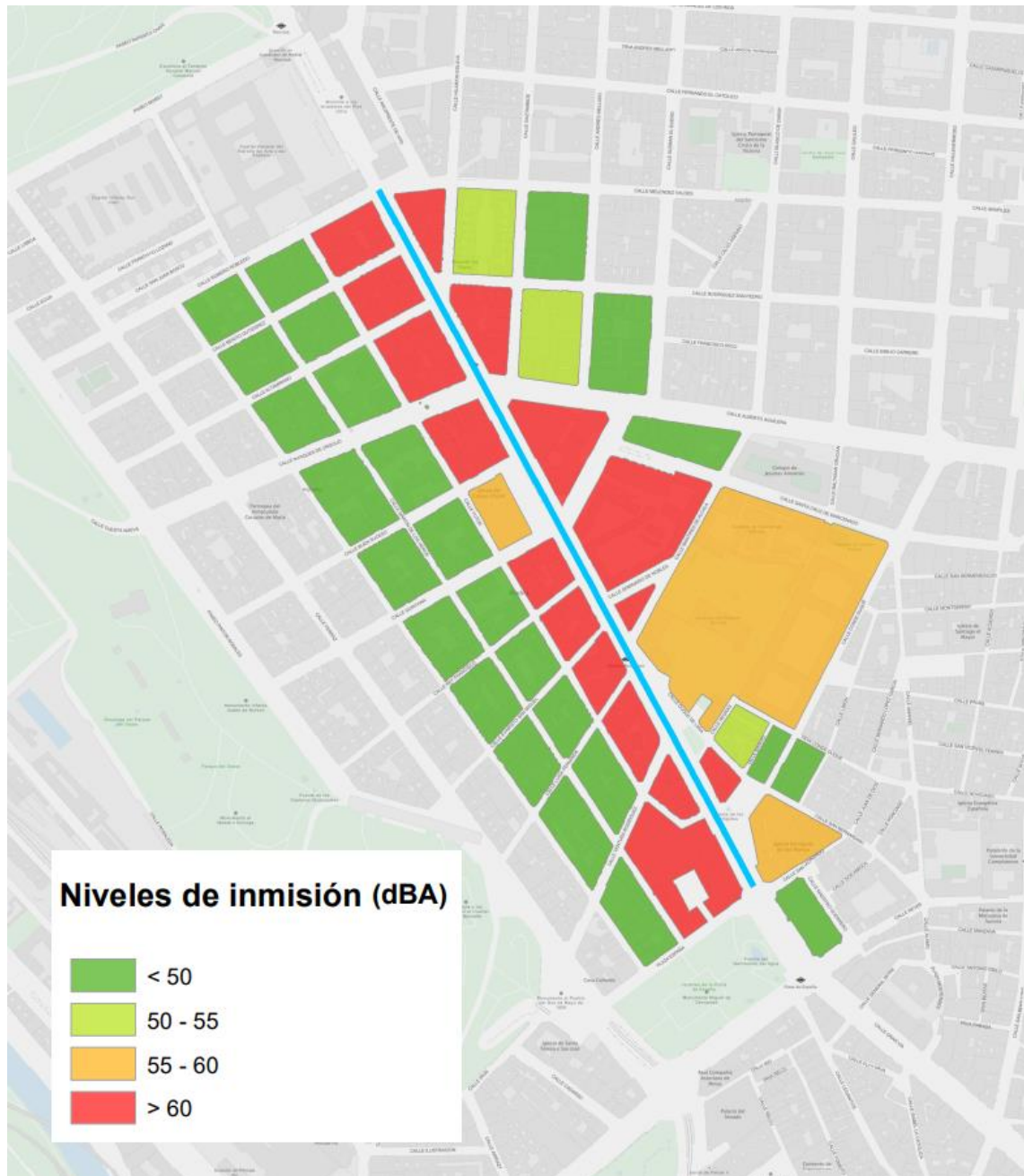


Figura 33. Representación del escenario CASO 1: toda la capa de edificios que rodean a la calle Princesa.

Como este es el escenario en el que más ruido está expuesta la calle Princesa, se ha tomado una simplificación del lugar, eligiendo únicamente los edificios más cercanos a esta vía pública para todos los escenarios próximos.

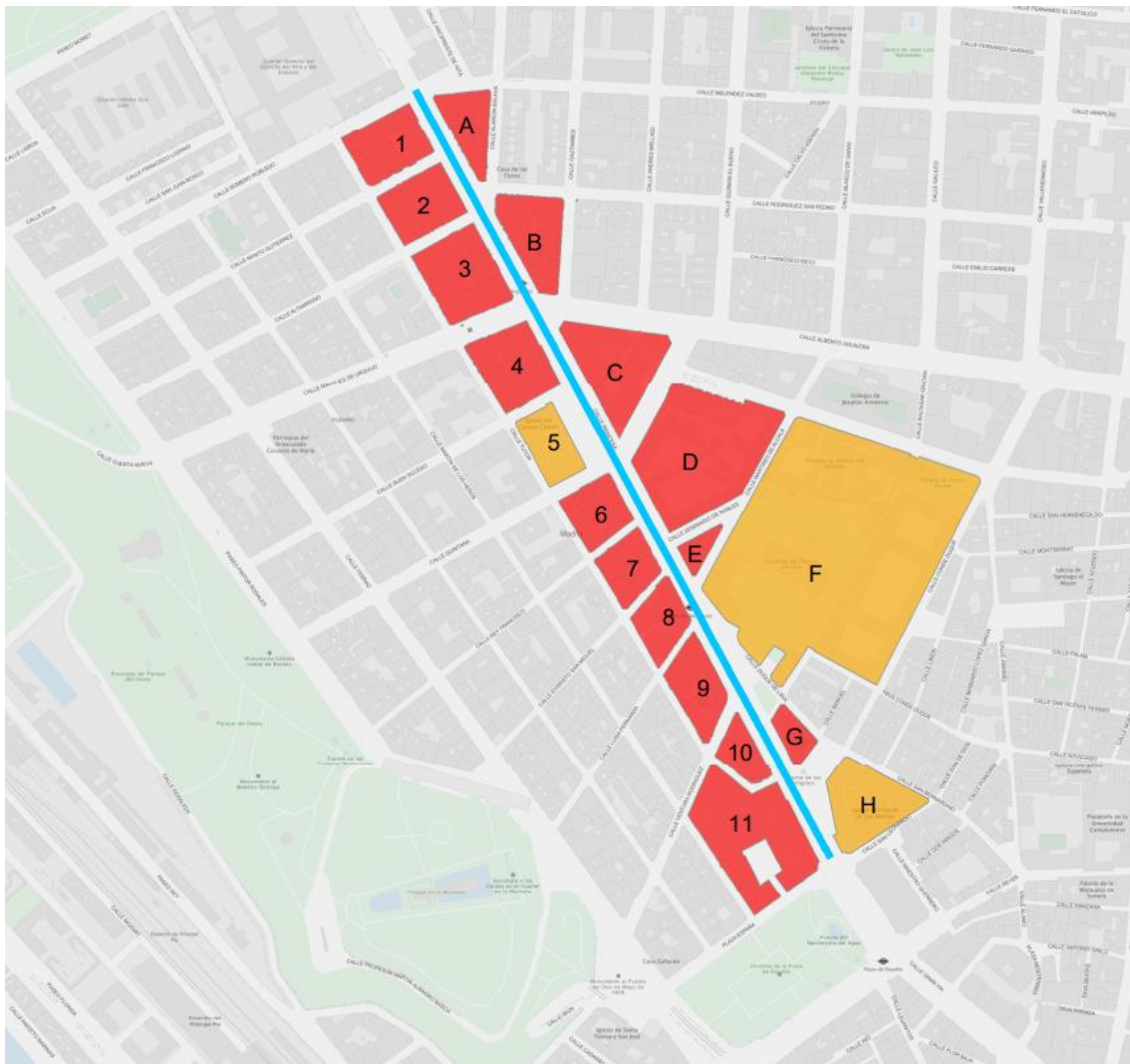


Figura 34. Representación los escenarios: edificios más expuestos a la calle Princesa.

Una vez es elegida la escena a simular, se procede a exportar desde ArcMap (4.5.1): carretera, capas de edificios y curvas de nivel en formato *shapefile* (.shp), que será de utilidad y servirá como dato de entrada para el software anteriormente comentado (4.5.2) en la predicción de ruido ambiental, CadnaA.

Tras montar el escenario en CadnaA e introducir el nivel de potencia sonora total que producen todos los vehículos en la carretera (de la calle Princesa, en este caso), elegimos el método de “Evaluación de Edificios”, el cual podemos ver en la Figura 35. Esta metodología se encarga de elaborar un conjunto de receptores de fachada que devuelvan el nivel de presión acústica que reciben.

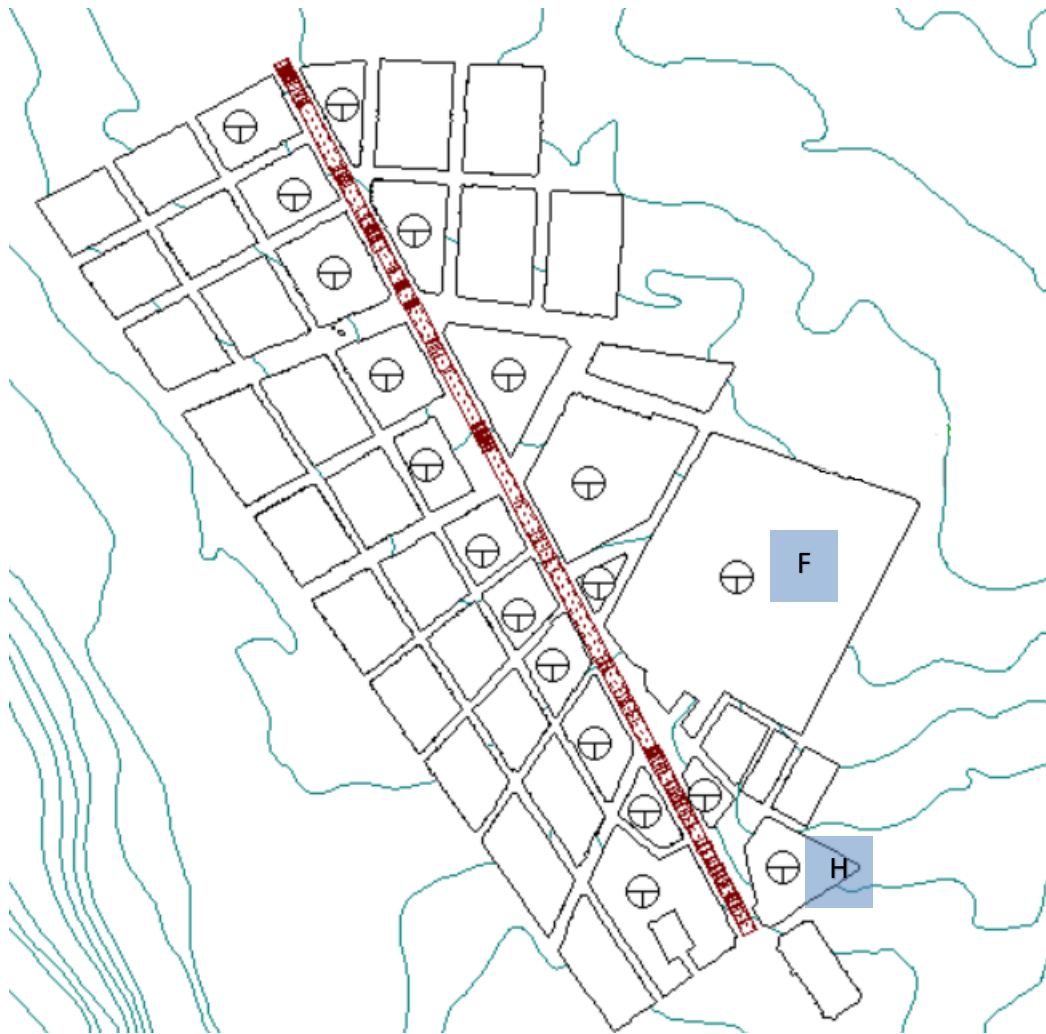


Figura 35. Representación del método “Evaluación en edificios” en CadnaA para todos los escenarios.

Los receptores en fachada de los edificios F y H no se tienen en cuenta debido a que no cuentan con ninguna vivienda en el interior de ellos. Previamente, justo antes de empezar la simulación son descartados.

Posteriormente, se procede a realizar un recuento de los receptores de fachada para cada uno de los edificios. Véase la Figura 36.

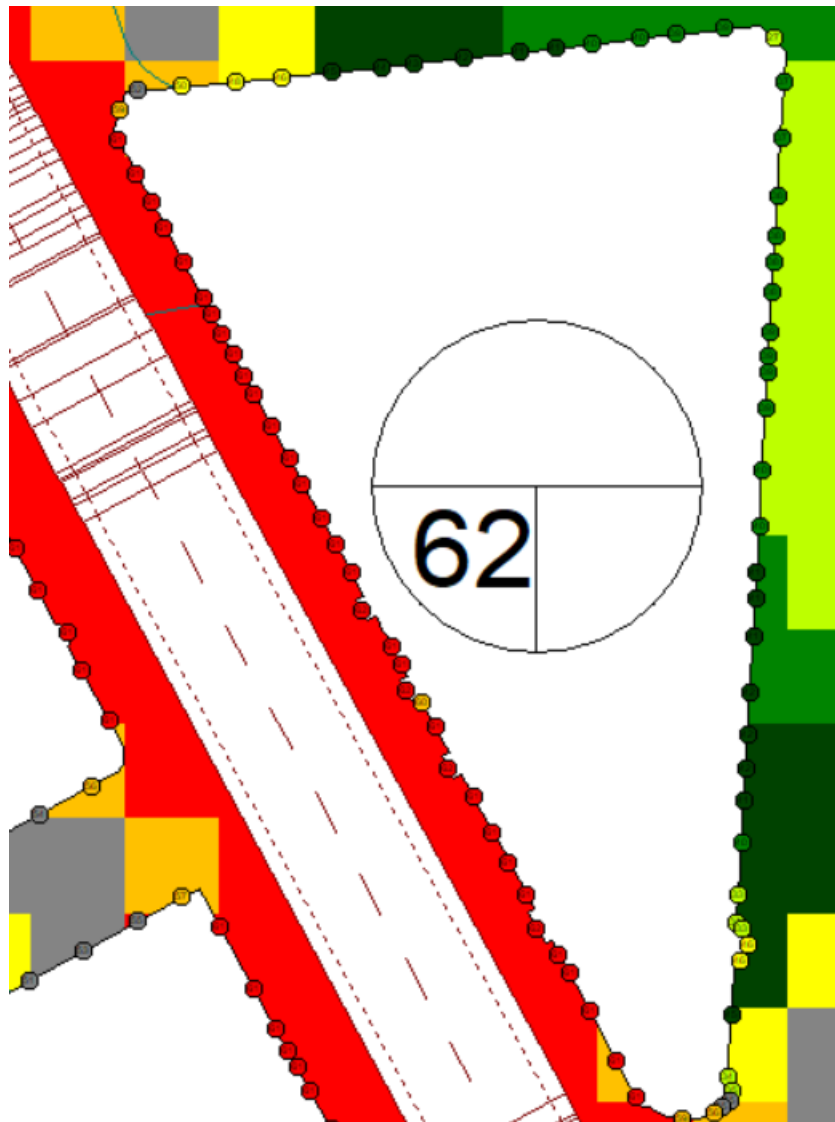


Figura 36. Ejemplo de evaluación de uno de los edificios del escenario del CASO 1.

Finalmente, conocidos los residentes para cada edificio se puede calcular cuántas personas corresponderían a cada uno de los micrófonos/receptores que rodean dicho edificio. Se muestra en la tabla que se presenta a continuación.

Tabla 42. Número total de personas por micrófono.

Edificios	Residentes	Número de micrófonos	Personas por micrófono
1	620	66	9,4
2	940	62	15,2
3	555	86	6,5
4	680	70	9,7
5	450	46	9,8
6	160	53	3,0
7	290	54	5,4
8	920	44	20,9
9	110	58	1,9
10	255	44	5,8
11	1120	118	9,5
A	630	82	7,7
B	590	97	6,1
C	300	62	4,8
D	130	88	1,5
E	130	24	5,4
F	0	0	Sin residentes
G	320	30	10,7
H	0	0	Sin residentes

A.4 Tablas de resultados para las personas expuestas al ruido

A.4.1. Escenarios de solamente vehículos eléctricos

➤ CASO 1

Tabla 43. Número de personas por micrófono y por nivel para cada edificio del Escenario 7.1 CASO 1

Edificios	Número de micrófonos total	Niveles	Recuento de micrófonos	Personas por micro	Personas por micrófono + las repartidas inferiores a la mediana	Total personas	Edificios	Número de micrófonos total	Niveles	Recuento de micrófonos	Personas por micro	Personas por micrófono + las repartidas inferiores a la mediana	Total personas
1	66	< Mediana	37	347,6	0,0	620	11	118	< Mediana	91	863,7	0,0	1120
		<25	10	93,9	209,8				<25	5	47,5	263,4	
		25-30	5	47,0	162,8				25-30	4	38,0	253,9	
		30-35	14	131,5	247,4				30-35	14	132,9	348,8	
		>35	0	0,0	0,0				>35	4	38,0	253,9	
2	62	< Mediana	26	394,2	0,0	940	A	82	< Mediana	30	230,5	0,0	630
		<25	16	242,6	374,0				<25	12	92,2	149,8	
		25-30	5	75,8	207,2				25-30	2	15,4	73,0	
		30-35	15	227,4	358,8				30-35	11	84,5	142,1	
		>35	0	0,0	0,0				>35	27	207,4	265,1	
3	86	< Mediana	39	251,7	0,0	555	B	97	< Mediana	44	267,6	0,0	590
		<25	16	103,3	166,2				<25	8	48,7	115,6	
		25-30	7	45,2	108,1				25-30	7	42,6	109,5	
		30-35	19	122,6	185,5				30-35	35	212,9	279,8	
		>35	5	32,3	95,2				>35	3	18,2	85,2	
4	70	< Mediana	24	233,1	0,0	680	C	62	< Mediana	20	96,8	0,0	300
		<25	17	165,1	223,4				<25	17	82,3	106,5	
		25-30	10	97,1	155,4				25-30	2	9,7	33,9	
		30-35	11	106,9	165,1				30-35	20	96,8	121,0	
		>35	8	77,7	136,0				>35	3	14,5	38,7	
5	46	< Mediana	19	185,9	0,0	450	D	88	< Mediana	53	78,3	0,0	130
		<25	13	127,2	220,1				<25	14	20,7	46,8	
		25-30	14	137,0	229,9				25-30	5	7,4	33,5	
		30-35	0	0,0	0,0				30-35	16	23,6	49,7	
		>35	0	0,0	0,0				>35	0	0,0	0,0	
6	53	< Mediana	15	45,3	0,0	160	E	24	< Mediana	1	5,4	0,0	130
		<25	19	57,4	68,7				<25	8	43,3	44,7	
		25-30	5	15,1	26,4				25-30	7	37,9	39,3	
		30-35	11	33,2	44,5				30-35	3	16,3	17,6	
		>35	3	9,1	20,4				>35	5	27,1	28,4	
7	54	< Mediana	22	118,1	0,0	290	F	152	< Mediana	0	0,0	0,0	0
		<25	8	43,0	72,5				<25	0	0,0	0,0	
		25-30	5	26,9	56,4				25-30	0	0,0	0,0	
		30-35	15	80,6	110,1				30-35	0	0,0	0,0	
		>35	4	21,5	51,0				>35	0	0,0	0,0	
8	44	< Mediana	25	522,7	0,0	920	G	30	< Mediana	12	128,0	0,0	320
		<25	5	104,5	235,2				<25	2	21,3	53,3	
		25-30	4	83,6	214,3				25-30	4	42,7	74,7	
		30-35	3	62,7	193,4				30-35	9	96,0	128,0	
		>35	7	146,4	277,0				>35	3	32,0	64,0	
9	58	< Mediana	30	56,9	0,0	110	H	58	< Mediana	0	0,0	0,0	0
		<25	10	19,0	37,9				<25	0	0,0	0,0	
		25-30	4	7,6	26,6				25-30	0	0,0	0,0	
		30-35	14	26,6	45,5				30-35	0	0,0	0,0	
		>35	0	0,0	0,0				>35	0	0,0	0,0	
10	44	< Mediana	11	63,8	0,0	255							
		<25	9	52,2	68,1								
		25-30	6	34,8	50,7								
		30-35	16	92,7	108,7								
		>35	2	11,6	27,5								

➤ CASO 2

Tabla 44. Número de personas por micrófono y por nivel para cada edificio del Escenario 7.1 CASO 2

Edificios	Número de micrófonos total	Niveles	Recuento de micrófonos	Personas por micro	Personas por micrófono + las repartidas inferiores a la mediana	Total personas
1	66	< Mediana	39	366,4	0,0	620
		<25	10	93,9	216,1	
		25-30	4	37,6	159,7	
		30-35	13	122,1	244,2	
		>35	0	0,0	0,0	
2	62	< Mediana	27	409,4	0,0	940
		<25	17	257,7	394,2	
		25-30	3	45,5	181,9	
		30-35	15	227,4	363,9	
		>35	0	0,0	0,0	
3	86	< Mediana	43	277,5	0,0	555
		<25	16	103,3	195,8	
		25-30	6	38,7	131,2	
		30-35	21	135,5	228,0	
		>35	0	0,0	0,0	
4	70	< Mediana	24	233,1	0,0	680
		<25	20	194,3	272,0	
		25-30	9	87,4	165,1	
		30-35	17	165,1	242,9	
		>35	0	0,0	0,0	
5	46	< Mediana	19	185,9	0,0	450
		<25	14	137,0	229,9	
		25-30	13	127,2	220,1	
		30-35	0	0,0	0,0	
		>35	0	0,0	0,0	
6	53	< Mediana	17	51,3	0,0	160
		<25	18	54,3	71,4	
		25-30	5	15,1	32,2	
		30-35	13	39,2	56,4	
		>35	0	0,0	0,0	
7	54	< Mediana	22	118,1	0,0	290
		<25	10	53,7	93,1	
		25-30	3	16,1	55,5	
		30-35	19	102,0	141,4	
		>35	0	0,0	0,0	
8	44	< Mediana	13	271,8	0,0	920
		<25	12	250,9	318,9	
		25-30	3	62,7	130,7	
		30-35	13	271,8	339,8	
		>35	3	62,7	130,7	
9	58	< Mediana	25	47,4	0,0	110
		<25	9	17,1	32,9	
		25-30	6	11,4	27,2	
		30-35	18	34,1	49,9	
		>35	0	0,0	0,0	
10	44	< Mediana	10	58,0	0,0	255
		<25	8	46,4	65,7	
		25-30	8	46,4	65,7	
		30-35	18	104,3	123,6	
		>35	0	0,0	0,0	
11	118	< Mediana	92	873,2	0,0	1120
		<25	4	38,0	329,0	
		25-30	5	47,5	338,5	
		30-35	17	161,4	452,4	
		>35	0	0,0	0,0	
A	82	< Mediana	31	238,2	0,0	630
		<25	10	76,8	156,2	
		25-30	4	30,7	110,1	
		30-35	37	284,3	363,7	
		>35	0	0,0	0,0	
B	97	< Mediana	40	243,3	0,0	590
		<25	8	48,7	129,8	
		25-30	7	42,6	123,7	
		30-35	42	255,5	336,6	
		>35	0	0,0	0,0	
C	62	< Mediana	19	91,9	0,0	300
		<25	17	82,3	112,9	
		25-30	3	14,5	45,2	
		30-35	23	111,3	141,9	
		>35	0	0,0	0,0	
D	88	< Mediana	54	79,8	0,0	130
		<25	14	20,7	47,3	
		25-30	5	7,4	34,0	
		30-35	15	22,2	48,8	
		>35	0	0,0	0,0	
E	24	< Mediana	2	10,8	0,0	130
		<25	12	65,0	68,6	
		25-30	4	21,7	25,3	
		30-35	6	32,5	36,1	
		>35	0	0,0	0,0	
F	152	< Mediana	0	0,0	0,0	0
		<25	0	0,0	0,0	
		25-30	0	0,0	0,0	
		30-35	0	0,0	0,0	
		>35	0	0,0	0,0	
G	30	< Mediana	10	106,7	0,0	320
		<25	3	32,0	67,6	
		25-30	5	53,3	88,9	
		30-35	12	128,0	163,6	
		>35	0	0,0	0,0	
H	58	< Mediana	0	0,0	0,0	0
		<25	0	0,0	0,0	
		25-30	0	0,0	0,0	
		30-35	0	0,0	0,0	
		>35	0	0,0	0,0	

➤ CASO 3

Tabla 45. Número de personas por micrófono y por nivel para cada edificio del Escenario 7.1 CASO 3

Edificios	Número de micrófonos total	Niveles	Recuento de micrófonos	Personas por micro	Personas por micrófono + las repartidas inferiores a la mediana	Total personas
1	66	< Mediana	36	338,2	0,0	620
		<25	11	103,3	187,9	
		25-30	4	37,6	122,1	
		30-35	3	28,2	112,7	
		>35	12	112,7	197,3	
2	62	< Mediana	27	409,4	0,0	940
		<25	16	242,6	344,9	
		25-30	4	60,6	163,0	
		30-35	2	30,3	132,7	
		>35	13	197,1	299,4	
3	86	< Mediana	40	258,1	0,0	555
		<25	15	96,8	161,3	
		25-30	7	45,2	109,7	
		30-35	3	19,4	83,9	
		>35	21	135,5	200,1	
4	70	< Mediana	24	233,1	0,0	680
		<25	15	145,7	204,0	
		25-30	12	116,6	174,9	
		30-35	4	38,9	97,1	
		>35	15	145,7	204,0	
5	46	< Mediana	22	215,2	0,0	450
		<25	9	88,0	159,8	
		25-30	3	29,3	101,1	
		30-35	12	117,4	189,1	
		>35	0	0,0	0,0	
6	53	< Mediana	19	57,4	0,0	160
		<25	10	30,2	44,5	
		25-30	9	27,2	41,5	
		30-35	3	9,1	23,4	
		>35	12	36,2	50,6	
7	54	< Mediana	22	118,1	0,0	290
		<25	8	43,0	72,5	
		25-30	4	21,5	51,0	
		30-35	7	37,6	67,1	
		>35	13	69,8	99,4	
8	44	< Mediana	25	522,7	0,0	920
		<25	5	104,5	235,2	
		25-30	4	83,6	214,3	
		30-35	2	41,8	172,5	
		>35	8	167,3	298,0	
9	58	< Mediana	30	56,9	0,0	110
		<25	8	15,2	29,4	
		25-30	6	11,4	25,6	
		30-35	1	1,9	16,1	
		>35	13	24,7	38,9	
10	44	< Mediana	14	81,1	0,0	255
		<25	8	46,4	66,6	
		25-30	4	23,2	43,5	
		30-35	3	17,4	37,7	
		>35	15	86,9	107,2	
11	118	< Mediana	92	873,2	0,0	1120
		<25	4	38,0	256,3	
		25-30	4	38,0	256,3	
		30-35	6	56,9	275,3	
		>35	12	113,9	332,2	
A	82	< Mediana	33	253,5	0,0	630
		<25	8	61,5	124,8	
		25-30	3	23,0	86,4	
		30-35	5	38,4	101,8	
		>35	33	253,5	316,9	
B	97	< Mediana	38	231,1	0,0	590
		<25	7	42,6	100,4	
		25-30	5	30,4	88,2	
		30-35	26	158,1	215,9	
		>35	21	127,7	185,5	
C	62	< Mediana	20	96,8	0,0	300
		<25	14	67,7	91,9	
		25-30	4	19,4	43,5	
		30-35	3	14,5	38,7	
		>35	21	101,6	125,8	
D	88	< Mediana	55	81,3	0,0	130
		<25	12	17,7	38,0	
		25-30	4	5,9	26,2	
		30-35	4	5,9	26,2	
		>35	13	19,2	39,5	
E	24	< Mediana	1	5,4	0,0	130
		<25	9	48,8	50,1	
		25-30	5	27,1	28,4	
		30-35	4	21,7	23,0	
		>35	5	27,1	28,4	
F	152	< Mediana	0	0,0	0,0	0
		<25	0	0,0	0,0	
		25-30	0	0,0	0,0	
		30-35	0	0,0	0,0	
		>35	0	0,0	0,0	
G	30	< Mediana	11	117,3	0,0	320
		<25	1	10,7	40,0	
		25-30	5	53,3	82,7	
		30-35	5	53,3	82,7	
		>35	8	85,3	114,7	
H	58	< Mediana	0	0,0	0,0	0
		<25	0	0,0	0,0	
		25-30	0	0,0	0,0	
		30-35	0	0,0	0,0	
		>35	0	0,0	0,0	

A.4.2. Escenarios de vehículos eléctricos y de combustión a velocidad constante

En este Anexo, se ha omitido el **CASO 5** debido a que es exactamente el mismo escenario y con los mismos resultados que el **CASO 1** del apartado anterior. (A.4.1.)

➤ **CASO 1**

Tabla 46. Número de personas por micrófono y por nivel para cada edificio del Escenario 7.2 CASO 1

Edificios	Número de micrófonos total	Niveles	Recuento de micrófonos	Personas por micro	Personas por micrófono + las repartidas inferiores a la mediana	Total personas	Edificios	Número de micrófonos total	Niveles	Recuento de micrófonos	Personas por micro	Personas por micrófono + las repartidas inferiores a la mediana	Total personas
1	66	< Mediana	38	357,0	0,0	620	11	118	< Mediana	92	873,2	0,0	1120
		<50	9	84,5	173,8				<50	4	38,0	256,3	
		50-55	4	37,6	126,8				50-55	4	38,0	256,3	
		55-60	4	37,6	126,8				55-60	6	56,9	275,3	
		> 60	11	103,3	192,6				> 60	12	113,9	332,2	
2	62	< Mediana	26	394,2	0,0	940	A	82	< Mediana	33	253,5	0,0	630
		<50	16	242,6	341,1				<50	8	61,5	124,8	
		50-55	4	60,6	159,2				50-55	2	15,4	78,8	
		55-60	3	45,5	144,0				55-60	6	46,1	109,5	
		> 60	13	197,1	295,6				> 60	33	253,5	316,9	
3	86	< Mediana	39	251,7	0,0	555	B	97	< Mediana	39	237,2	0,0	590
		<50	16	103,3	166,2				<50	7	42,6	101,9	
		50-55	7	45,2	108,1				50-55	4	24,3	83,6	
		55-60	3	19,4	82,3				55-60	26	158,1	217,4	
		> 60	21	135,5	198,4				> 60	21	127,7	187,0	
4	70	< Mediana	25	242,9	0,0	680	C	62	< Mediana	21	101,6	0,0	300
		<50	15	145,7	206,4				<50	12	58,1	83,5	
		50-55	12	116,6	177,3				50-55	5	24,2	49,6	
		55-60	5	48,6	109,3				55-60	4	19,4	44,8	
		> 60	13	126,3	187,0				> 60	20	96,8	122,2	
5	46	< Mediana	22	215,2	0,0	450	D	88	< Mediana	52	76,8	0,0	130
		<50	9	88,0	159,8				<50	13	19,2	38,4	
		50-55	2	19,6	91,3				50-55	6	8,9	28,1	
		55-60	13	127,2	198,9				55-60	4	5,9	25,1	
		> 60	0	0,0	0,0				> 60	13	19,2	38,4	
6	53	< Mediana	17	51,3	0,0	160	E	24	< Mediana	1	5,4	0,0	130
		<50	11	33,2	46,0				<50	9	48,8	50,1	
		50-55	10	30,2	43,0				50-55	6	32,5	33,9	
		55-60	3	9,1	21,9				55-60	3	16,3	17,6	
		> 60	12	36,2	49,1				> 60	5	27,1	28,4	
7	54	< Mediana	22	118,1	0,0	290	F	152	< Mediana	0	0,0	0,0	0
		<50	8	43,0	72,5				<50	0	0,0	0,0	
		50-55	4	21,5	51,0				50-55	0	0,0	0,0	
		55-60	8	43,0	72,5				55-60	0	0,0	0,0	
		> 60	12	64,4	94,0				> 60	0	0,0	0,0	
8	44	< Mediana	26	543,6	0,0	920	G	30	< Mediana	10	106,7	0,0	320
		<50	5	104,5	240,5				<50	1	10,7	37,3	
		50-55	3	62,7	198,6				50-55	5	53,3	80,0	
		55-60	3	62,7	198,6				55-60	5	53,3	80,0	
		> 60	7	146,4	282,3				> 60	9	96,0	122,7	
9	58	< Mediana	32	60,7	0,0	110	H	58	< Mediana	0	0,0	0,0	0
		<50	8	15,2	30,3				<50	0	0,0	0,0	
		50-55	4	7,6	22,8				50-55	0	0,0	0,0	
		55-60	1	1,9	17,1				55-60	0	0,0	0,0	
		> 60	13	24,7	39,8				> 60	0	0,0	0,0	
10	44	< Mediana	11	63,8	0,0	255							
		<50	8	46,4	62,3								
		50-55	7	40,6	56,5								
		55-60	3	17,4	33,3								
		> 60	15	86,9	102,9								

➤ CASO 2

Tabla 47. Número de personas por micrófono y por nivel para cada edificio del Escenario 7.2 CASO 2

Edificios	Número de micrófonos total	Niveles	Recuento de micrófonos	Personas por micrófono	Personas por micrófono + las repartidas inferiores a la mediana	Total personas
1	66	< Mediana	37	347,6	0,0	620
		<50	10	93,9	209,8	
		50-55	5	47,0	162,8	
		55-60	14	131,5	247,4	
		> 60	0	0,0	0,0	
2	62	< Mediana	26	394,2	0,0	940
		<50	17	257,7	389,1	
		50-55	5	75,8	207,2	
		55-60	14	212,3	343,7	
		> 60	0	0,0	0,0	
3	86	< Mediana	40	258,1	0,0	555
		<50	18	116,2	202,2	
		50-55	6	38,7	124,8	
		55-60	22	142,0	228,0	
		> 60	0	0,0	0,0	
4	70	< Mediana	24	233,1	0,0	680
		<50	19	184,6	242,9	
		50-55	9	87,4	145,7	
		55-60	15	145,7	204,0	
		> 60	3	29,1	87,4	
5	46	< Mediana	21	205,4	0,0	450
		<50	12	117,4	220,1	
		50-55	13	127,2	229,9	
		55-60	0	0,0	0,0	
		> 60	0	0,0	0,0	
6	53	< Mediana	17	51,3	0,0	160
		<50	16	48,3	65,4	
		50-55	7	21,1	38,2	
		55-60	13	39,2	56,4	
		> 60	0	0,0	0,0	
7	54	< Mediana	22	118,1	0,0	290
		<50	9	48,3	87,7	
		50-55	4	21,5	60,9	
		55-60	19	102,0	141,4	
		> 60	0	0,0	0,0	
8	44	< Mediana	25	522,7	0,0	920
		<50	7	146,4	277,0	
		50-55	2	41,8	172,5	
		55-60	3	62,7	193,4	
		> 60	7	146,4	277,0	
9	58	< Mediana	32	60,7	0,0	110
		<50	9	17,1	37,3	
		50-55	4	7,6	27,8	
		55-60	13	24,7	44,9	
		> 60	0	0,0	0,0	
10	44	< Mediana	11	63,8	0,0	255
		<50	9	52,2	73,4	
		50-55	6	34,8	56,0	
		55-60	18	104,3	125,6	
		> 60	0	0,0	0,0	
11	118	< Mediana	91	863,7	0,0	1120
		<50	5	47,5	263,4	
		50-55	5	47,5	263,4	
		55-60	16	151,9	367,8	
		> 60	1	9,5	225,4	
A	82	< Mediana	33	253,5	0,0	630
		<50	9	69,1	132,5	
		50-55	4	30,7	94,1	
		55-60	32	245,9	309,2	
		> 60	4	30,7	94,1	
B	97	< Mediana	40	243,3	0,0	590
		<50	8	48,7	129,8	
		50-55	8	48,7	129,8	
		55-60	41	249,4	330,5	
		> 60	0	0,0	0,0	
C	62	< Mediana	21	101,6	0,0	300
		<50	13	62,9	96,8	
		50-55	4	19,4	53,2	
		55-60	24	116,1	150,0	
		> 60	0	0,0	0,0	
D	88	< Mediana	54	79,8	0,0	130
		<50	13	19,2	45,8	
		50-55	6	8,9	35,5	
		55-60	15	22,2	48,8	
		> 60	0	0,0	0,0	
E	24	< Mediana	3	16,3	0,0	130
		<50	8	43,3	48,8	
		50-55	5	27,1	32,5	
		55-60	8	43,3	48,8	
		> 60	0	0,0	0,0	
F	152	< Mediana	0	0,0	0,0	0
		<50	0	0,0	0,0	
		50-55	0	0,0	0,0	
		55-60	0	0,0	0,0	
		> 60	0	0,0	0,0	
G	30	< Mediana	10	106,7	0,0	320
		<50	2	21,3	56,9	
		50-55	5	53,3	88,9	
		55-60	13	138,7	174,2	
		> 60	0	0,0	0,0	
H	58	< Mediana	0	0,0	0,0	0
		<50	0	0,0	0,0	
		50-55	0	0,0	0,0	
		55-60	0	0,0	0,0	
		> 60	0	0,0	0,0	

➤ CASO 3

Tabla 48. Número de personas por micrófono y por nivel para cada edificio del Escenario 7.2 CASO 3

Edificios	Número de micrófonos total	Niveles	Recuento de micrófonos	Personas por micro	Personas por micrófono + las repartidas inferiores a la mediana	Total personas
1	66	< Mediana	35	328,8	0,0	620
		<50	14	131,5	241,1	
		50-55	4	37,6	147,2	
		55-60	13	122,1	231,7	
		> 60	0	0,0	0,0	
2	62	< Mediana	26	394,2	0,0	940
		<50	18	272,9	404,3	
		50-55	5	75,8	207,2	
		55-60	13	197,1	328,5	
		> 60	0	0,0	0,0	
3	86	< Mediana	38	245,2	0,0	555
		<50	20	129,1	210,8	
		50-55	5	32,3	114,0	
		55-60	23	148,4	230,2	
		> 60	0	0,0	0,0	
4	70	< Mediana	27	262,3	0,0	680
		<50	19	184,6	272,0	
		50-55	7	68,0	155,4	
		55-60	17	165,1	252,6	
		> 60	0	0,0	0,0	
5	46	< Mediana	23	225,0	0,0	450
		<50	11	107,6	220,1	
		50-55	12	117,4	229,9	
		55-60	0	0,0	0,0	
		> 60	0	0,0	0,0	
6	53	< Mediana	16	48,3	0,0	160
		<50	20	60,4	76,5	
		50-55	5	15,1	31,2	
		55-60	12	36,2	52,3	
		> 60	0	0,0	0,0	
7	54	< Mediana	21	112,8	0,0	290
		<50	11	59,1	96,7	
		50-55	4	21,5	59,1	
		55-60	18	96,7	134,3	
		> 60	0	0,0	0,0	
8	44	< Mediana	25	522,7	0,0	920
		<50	7	146,4	320,6	
		50-55	3	62,7	237,0	
		55-60	9	188,2	362,4	
		> 60	0	0,0	0,0	
9	58	< Mediana	32	60,7	0,0	110
		<50	10	19,0	39,2	
		50-55	3	5,7	25,9	
		55-60	13	24,7	44,9	
		> 60	0	0,0	0,0	
10	44	< Mediana	11	63,8	0,0	255
		<50	10	58,0	79,2	
		50-55	5	29,0	50,2	
		55-60	18	104,3	125,6	
		> 60	0	0,0	0,0	
11	118	< Mediana	92	873,2	0,0	1120
		<50	5	47,5	338,5	
		50-55	5	47,5	338,5	
		55-60	16	151,9	442,9	
		> 60	0	0,0	0,0	
A	82	< Mediana	33	253,5	0,0	630
		<50	10	76,8	161,3	
		50-55	3	23,0	107,6	
		55-60	36	276,6	361,1	
		> 60	0	0,0	0,0	
B	97	< Mediana	40	243,3	0,0	590
		<50	9	54,7	135,8	
		50-55	13	79,1	160,2	
		55-60	35	212,9	294,0	
		> 60	0	0,0	0,0	
C	62	< Mediana	20	96,8	0,0	300
		<50	16	77,4	109,7	
		50-55	2	9,7	41,9	
		55-60	24	116,1	148,4	
		> 60	0	0,0	0,0	
D	88	< Mediana	52	76,8	0,0	130
		<50	16	23,6	49,2	
		50-55	6	8,9	34,5	
		55-60	14	20,7	46,3	
		> 60	0	0,0	0,0	
E	24	< Mediana	2	10,8	0,0	130
		<50	11	59,6	63,2	
		50-55	6	32,5	36,1	
		55-60	5	27,1	30,7	
		> 60	0	0,0	0,0	
F	152	< Mediana	0	0,0	0,0	0
		<50	0	0,0	0,0	
		50-55	0	0,0	0,0	
		55-60	0	0,0	0,0	
		> 60	0	0,0	0,0	
G	30	< Mediana	9	96,0	0,0	320
		<50	5	53,3	85,3	
		50-55	6	64,0	96,0	
		55-60	10	106,7	138,7	
		> 60	0	0,0	0,0	
H	58	< Mediana	0	0,0	0,0	0
		<50	0	0,0	0,0	
		50-55	0	0,0	0,0	
		55-60	0	0,0	0,0	
		> 60	0	0,0	0,0	

➤ CASO 4

Tabla 49. Número de personas por micrófono y por nivel para cada edificio del Escenario 7.2 CASO 4

Edificios	Número de micrófonos total	Niveles	Recuento de micrófonos	Personas por micro	Personas por micrófono + las repartidas inferiores a la mediana	Total personas
1	66	< Mediana	36	338,2	0,0	620
		< 45	11	103,3	216,1	
		45-50	5	47,0	159,7	
		50-55	14	131,5	244,2	
		> 55	0	0,0	0,0	
2	62	< Mediana	26	394,2	0,0	940
		< 45	17	257,7	389,1	
		45-50	5	75,8	207,2	
		50-55	14	212,3	343,7	
		> 55	0	0,0	0,0	
3	86	< Mediana	40	258,1	0,0	555
		< 45	17	109,7	195,8	
		45-50	7	45,2	131,2	
		50-55	22	142,0	228,0	
		> 55	0	0,0	0,0	
4	70	< Mediana	24	233,1	0,0	680
		< 45	19	184,6	242,9	
		45-50	9	87,4	145,7	
		50-55	15	145,7	204,0	
		> 55	3	29,1	87,4	
5	46	< Mediana	22	215,2	0,0	450
		< 45	11	107,6	215,2	
		45-50	13	127,2	234,8	
		50-55	0	0,0	0,0	
		> 55	0	0,0	0,0	
6	53	< Mediana	16	48,3	0,0	160
		< 45	15	45,3	61,4	
		45-50	9	27,2	43,3	
		50-55	13	39,2	55,3	
		> 55	0	0,0	0,0	
7	54	< Mediana	22	118,1	0,0	290
		< 45	8	43,0	82,3	
		45-50	5	26,9	66,2	
		50-55	19	102,0	141,4	
		> 55	0	0,0	0,0	
8	44	< Mediana	24	501,8	0,0	920
		< 45	7	146,4	271,8	
		45-50	3	62,7	188,2	
		50-55	3	62,7	188,2	
		> 55	7	146,4	271,8	
9	58	< Mediana	32	60,7	0,0	110
		< 45	9	17,1	37,3	
		45-50	4	7,6	27,8	
		50-55	13	24,7	44,9	
		> 55	0	0,0	0,0	
10	44	< Mediana	11	63,8	0,0	255
		< 45	9	52,2	73,4	
		45-50	6	34,8	56,0	
		50-55	18	104,3	125,6	
		> 55	0	0,0	0,0	
11	118	< Mediana	92	873,2	0,0	1120
		< 45	4	38,0	256,3	
		45-50	5	47,5	265,8	
		50-55	16	151,9	370,2	
		> 55	1	9,5	227,8	
A	82	< Mediana	33	253,5	0,0	630
		< 45	9	69,1	132,5	
		45-50	4	30,7	94,1	
		50-55	32	245,9	309,2	
		> 55	4	30,7	94,1	
B	97	< Mediana	40	243,3	0,0	590
		< 45	8	48,7	129,8	
		45-50	8	48,7	129,8	
		50-55	41	249,4	330,5	
		> 55	0	0,0	0,0	
C	62	< Mediana	20	96,8	0,0	300
		< 45	13	62,9	95,2	
		45-50	4	19,4	51,6	
		50-55	25	121,0	153,2	
		> 55	0	0,0	0,0	
D	88	< Mediana	53	78,3	0,0	130
		< 45	14	20,7	46,8	
		45-50	6	8,9	35,0	
		50-55	15	22,2	48,3	
		> 55	0	0,0	0,0	
E	24	< Mediana	4	21,7	0,0	130
		< 45	9	48,8	56,0	
		45-50	3	16,3	23,5	
		50-55	8	43,3	50,6	
		> 55	0	0,0	0,0	
F	152	< Mediana	0	0,0	0,0	0
		< 45	0	0,0	0,0	
		45-50	0	0,0	0,0	
		50-55	0	0,0	0,0	
		> 55	0	0,0	0,0	
G	30	< Mediana	10	106,7	0,0	320
		< 45	2	21,3	56,9	
		45-50	5	53,3	88,9	
		50-55	13	138,7	174,2	
		> 55	0	0,0	0,0	
H	58	< Mediana	0	0,0	0,0	0
		< 45	0	0,0	0,0	
		45-50	0	0,0	0,0	
		50-55	0	0,0	0,0	
		> 55	0	0,0	0,0	

➤ **CASO ELÉCTRICOS** Tabla 50. Número de personas por micrófono y por nivel para cada edificio del Escenario 7.2 CASO ELÉCTRICOS

Edificios	Número de micrófonos total	Niveles	Recuento de micrófonos	Personas por micro	Personas por micrófono + las repartidas inferiores a la mediana	Total personas
1	66	< Mediana	36	338,2	0,0	620
		<30	9	84,5	169,1	
		30-35	5	47,0	131,5	
		35-40	3	28,2	112,7	
		>40	13	122,1	206,7	
2	62	< Mediana	27	409,4	0,0	940
		<30	14	212,3	314,6	
		30-35	5	75,8	178,1	
		35-40	3	45,5	147,8	
		>40	13	197,1	299,4	
3	86	< Mediana	41	264,6	0,0	555
		<30	13	83,9	150,0	
		30-35	8	51,6	117,8	
		35-40	3	19,4	85,5	
		>40	21	135,5	201,7	
4	70	< Mediana	25	242,9	0,0	680
		<30	14	136,0	196,7	
		30-35	11	106,9	167,6	
		35-40	5	48,6	109,3	
		>40	15	145,7	206,4	
5	46	< Mediana	22	215,2	0,0	450
		<30	8	78,3	150,0	
		30-35	3	29,3	101,1	
		35-40	13	127,2	198,9	
		>40	0	0,0	0,0	
6	53	< Mediana	17	51,3	0,0	160
		<30	8	24,2	37,0	
		30-35	13	39,2	52,1	
		35-40	3	9,1	21,9	
		>40	12	36,2	49,1	
7	54	< Mediana	22	118,1	0,0	290
		<30	8	43,0	72,5	
		30-35	3	16,1	45,6	
		35-40	6	32,2	61,8	
		>40	15	80,6	110,1	
8	44	< Mediana	27	564,5	0,0	920
		<30	3	62,7	203,9	
		30-35	4	83,6	224,8	
		35-40	2	41,8	183,0	
		>40	8	167,3	308,4	
9	58	< Mediana	32	60,7	0,0	110
		<30	8	15,2	30,3	
		30-35	4	7,6	22,8	
		35-40	1	1,9	17,1	
		>40	13	24,7	39,8	
10	44	< Mediana	12	69,5	0,0	255
		<30	6	34,8	52,2	
		30-35	8	46,4	63,8	
		35-40	3	17,4	34,8	
		>40	15	86,9	104,3	
11	118	< Mediana	92	873,2	0,0	1120
		<30	3	28,5	246,8	
		30-35	5	47,5	265,8	
		35-40	5	47,5	265,8	
		>40	13	123,4	341,7	
A	82	< Mediana	36	276,6	0,0	630
		<30	6	46,1	115,2	
		30-35	2	15,4	84,5	
		35-40	4	30,7	99,9	
		>40	34	261,2	330,4	
B	97	< Mediana	43	261,5	0,0	590
		<30	5	30,4	95,8	
		30-35	4	24,3	89,7	
		35-40	22	133,8	199,2	
		>40	23	139,9	205,3	
C	62	< Mediana	22	106,5	0,0	300
		<30	11	53,2	79,8	
		30-35	6	29,0	55,6	
		35-40	3	14,5	41,1	
		>40	20	96,8	123,4	
D	88	< Mediana	55	81,3	0,0	130
		<30	10	14,8	35,1	
		30-35	6	8,9	29,2	
		35-40	4	5,9	26,2	
		>40	13	19,2	39,5	
E	24	< Mediana	3	16,3	0,0	130
		<30	8	43,3	47,4	
		30-35	4	21,7	25,7	
		35-40	4	21,7	25,7	
		>40	5	27,1	31,1	
F	152	< Mediana	0	0,0	0,0	0
		<30	0	0,0	0,0	
		30-35	0	0,0	0,0	
		35-40	0	0,0	0,0	
		>40	0	0,0	0,0	
G	30	< Mediana	11	117,3	0,0	320
		<30	1	10,7	40,0	
		30-35	5	53,3	82,7	
		35-40	5	53,3	82,7	
		>40	8	85,3	114,7	
H	58	< Mediana	0	0,0	0,0	0
		<30	0	0,0	0,0	
		30-35	0	0,0	0,0	
		35-40	0	0,0	0,0	
		>40	0	0,0	0,0	

➤ CASO BAJA VELOCIDAD Tabla 51. Número de personas por micrófono y por nivel para cada edificio del Escenario 7.2 BAJA VELOCIDAD

Edificios	Número de micrófonos total	Niveles	Recuento de micrófonos	Personas por micro	Personas por micrófono + las repartidas inferiores a la mediana	Total personas
1	66	< Mediana	35	328,8	0,0	620
		<50	12	112,7	222,3	
		50-55	4	37,6	147,2	
		55-60	15	140,9	250,5	
		> 60	0	0,0	0,0	
2	62	< Mediana	26	394,2	0,0	940
		<50	18	272,9	404,3	
		50-55	4	60,6	192,0	
		55-60	14	212,3	343,7	
		> 60	0	0,0	0,0	
3	86	< Mediana	38	245,2	0,0	555
		<50	20	129,1	210,8	
		50-55	6	38,7	120,5	
		55-60	22	142,0	223,7	
		> 60	0	0,0	0,0	
4	70	< Mediana	24	233,1	0,0	680
		<50	20	194,3	272,0	
		50-55	9	87,4	165,1	
		55-60	17	165,1	242,9	
		> 60	0	0,0	0,0	
5	46	< Mediana	19	185,9	0,0	450
		<50	14	137,0	229,9	
		50-55	13	127,2	220,1	
		55-60	0	0,0	0,0	
		> 60	0	0,0	0,0	
6	53	< Mediana	18	54,3	0,0	160
		<50	17	51,3	69,4	
		50-55	5	15,1	33,2	
		55-60	13	39,2	57,4	
		> 60	0	0,0	0,0	
7	54	< Mediana	22	118,1	0,0	290
		<50	10	53,7	93,1	
		50-55	3	16,1	55,5	
		55-60	19	102,0	141,4	
		> 60	0	0,0	0,0	
8	44	< Mediana	25	522,7	0,0	920
		<50	7	146,4	277,0	
		50-55	2	41,8	172,5	
		55-60	3	62,7	193,4	
		> 60	7	146,4	277,0	
9	58	< Mediana	30	56,9	0,0	110
		<50	12	22,8	41,7	
		50-55	3	5,7	24,7	
		55-60	13	24,7	43,6	
		> 60	0	0,0	0,0	
10	44	< Mediana	11	63,8	0,0	255
		<50	9	52,2	73,4	
		50-55	6	34,8	56,0	
		55-60	18	104,3	125,6	
		> 60	0	0,0	0,0	
11	118	< Mediana	92	873,2	0,0	1120
		<50	4	38,0	329,0	
		50-55	5	47,5	338,5	
		55-60	17	161,4	452,4	
		> 60	0	0,0	0,0	
A	82	< Mediana	32	245,9	0,0	630
		<50	10	76,8	158,8	
		50-55	4	30,7	112,7	
		55-60	36	276,6	358,5	
		> 60	0	0,0	0,0	
B	97	< Mediana	39	237,2	0,0	590
		<50	8	48,7	127,7	
		50-55	9	54,7	133,8	
		55-60	41	249,4	328,5	
		> 60	0	0,0	0,0	
C	62	< Mediana	19	91,9	0,0	300
		<50	17	82,3	112,9	
		50-55	3	14,5	45,2	
		55-60	23	111,3	141,9	
		> 60	0	0,0	0,0	
D	88	< Mediana	53	78,3	0,0	130
		<50	14	20,7	46,8	
		50-55	6	8,9	35,0	
		55-60	15	22,2	48,3	
		> 60	0	0,0	0,0	
E	24	< Mediana	2	10,8	0,0	130
		<50	11	59,6	63,2	
		50-55	5	27,1	30,7	
		55-60	6	32,5	36,1	
		> 60	0	0,0	0,0	
F	152	< Mediana	0	0,0	0,0	0
		<50	0	0,0	0,0	
		50-55	0	0,0	0,0	
		55-60	0	0,0	0,0	
		> 60	0	0,0	0,0	
G	30	< Mediana	10	106,7	0,0	320
		<50	3	32,0	67,6	
		50-55	5	53,3	88,9	
		55-60	12	128,0	163,6	
		> 60	0	0,0	0,0	
H	58	< Mediana	0	0,0	0,0	0
		<50	0	0,0	0,0	
		50-55	0	0,0	0,0	
		55-60	0	0,0	0,0	
		> 60	0	0,0	0,0	