

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



ESTUDIO DE METASUPERFICIE DE
RODADURA PARA OPTIMIZAR LA
EMISIÓN SONORA DE UN
NEUMÁTICO

TRABAJO FIN DE GRADO

Septiembre - 2023

AUTOR: Sergio Núñez Andrés

DIRECTORES: Nuria Campillo Davó

Miguel Fabra Rodríguez



UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



ESTUDIO DE METASUPERFICIE DE
RODADURA PARA OPTIMIZAR LA
EMISIÓN SONORA DE UN
NEUMÁTICO

TRABAJO FIN DE GRADO

Septiembre -2023

AUTOR: Sergio Núñez Andrés

DIRECTORES: Nuria Campillo Davó

Miguel Fabra Rodríguez



ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	OBJETIVO DEL ESTUDIO	3
2	RUIDO EN VEHÍCULOS	5
2.1	GENERACIÓN DEL RUIDO	5
2.1.1	RUIDO MECÁNICO	6
2.1.2	RUIDO AERODINÁMICO	7
2.1.3	RUIDO DE RODADURA	8
2.2	MECANISMOS DE GENERACIÓN DE RUIDO EN LA RODADURA	8
3	MÉTODOS DE ESTUDIO Y EVALUACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA	13
3.1	METODOLOGÍAS ESTANDARIZADAS DE MEDICIÓN DEL RUIDO DE RODADURA ...	13
3.2	METODOLOGÍAS NO ESTANDARIZADAS	18
3.2.1	Laboratory Drum (DR).....	19
3.2.2	Far-field Acoustic Array Technology (FAAT)	20
3.2.3	Near-field Acoustic Array Technology (NAAT).....	22
3.2.4	The vibration Measurement (TVM)	23
3.3	MODELACIÓN DEL CONTACTO NEUMÁTICO / PAVIMENTO	24
4	ANTECEDENTES.....	29
4.1	FIRMES SUPERFICIALES QUE ACTÚAN COMO FONOEMISSORES	29
5	HERRAMIENTAS UTILIZADAS	33
5.1	COMSOL MULTIPHYSICS.....	33
5.2	AUTODESK INVENTOR	34
5.3	SONÓMETRO Y EQUIPO DE MEDIDA	35

5.4	MEDIDAS DE INTERÉS OBTENIDAS.....	37
6	ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS	39
6.1	MODELOS ENSAYADOS.....	39
6.2	PROCESADO DE DATOS Y RESULTADOS.....	52
6.2.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	53
6.2.2	RESULTADOS OBTENIDOS EN CADA MODELO	56
6.2.3	RESULTADOS COMPARADOS DE CADA MODELO.....	78
6.2.4	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	79
6.3	PROPUESTA DE DISEÑO FINAL	79
6.4	COMPROBACIÓN A RESISTENCIA DEL MODELO	90
7	CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS.....	92
7.1	CONCLUSIÓN.....	92
7.2	TRABAJOS FUTUROS	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de fuentes sonoras de un automóvil.	5
Figura 2: Aerodinámica de un vehículo	7
Figura 3: Generación de ruido por vibraciones.	9
Figura 4: Mecanismos de generación de ruido en la rodadura. Fuente: elaboración propia.	9
Figura 5: Fuentes de ruido en la rodadura. Fuente: elaboración propia.	10
Figura 6: Efecto Bocina o Horn Effect.	11
Figura 7: Posiciones de los micrófonos para el ensayo CPX.	16
Figura 8: Método Statistical Pass-By	18
Figura 9: Equipo en cadena para desarrollar el estudio de campo sonoro lejano..	21
Figura 10: Near-Field Acoustic Array Technology (NAAT)	22
Figura 11: Clasificación de modelos de neumáticos	26
Figura 12: Musical Road in Lancaster, California	31
Figura 13: Sonómetro Empleado.	36
Figura 14: Sonómetro realizando una medición en Plaza del Congreso Eucarístico.	38
Figura 15: Modelo ideal geometrías.	40
Figura 16: Esfera con punto en el centro.	41
Figura 17: Selección de elementos FEM y BEM.	42
Figura 18: Mallado de los elementos.	43
Figura 19: Campo de presión acústica expresada en Pa.	44
Figura 20: Campo de nivel de presión sonora.	45

Figura 21: Segundo Modelo o Modelo Conductos Verticales.	48
Figura 22: Modelo Conductos Horizontales en Comsol.	49
Figura 23: Modelo de Ranura Corta en Inventor.	50
Figura 24: Modelo de Ranura Corta diseñado en Comsol.	51
Figura 25: Vista inferior del Modelo de Ranura Corta.	52
Figura 26: Selección de geometrías de elementos finitos.	54
Figura 27: Selección de geometrías de elementos de contorno.	55
Figura 28: Presión sonora de elementos finitos en decibelios (A) y Pascales (B).	56
Figura 29: Campo de presión acústica en pascales multiplano (A) y en elementos BEM (B) para modelo de referencia.	58
Figura 30: Nivel de presión sonora medido en decibelios en plano tridimensional (A) y vista lateral (B).	60
Figura 31: Presión acústica elementos FEM en pascales (A) y en decibelios (B).	62
Figura 32: Campo de presión acústica en BEM medido en pascales (A) y multiplano (B) en Modelo de Referencia.	64
Figura 33: Nivel de presión sonora en decibelios (A) y multiplano (B).	66
Figura 34: Nivel de presión sonora en elementos finitos calculados en decibelios (A) y en pascales (B) en Modelo Rectangular.	68
Figura 35: Campo de presiones sonoras en pascales total (A) y de elementos BEM (B) de Modelo Rectangular.	70
Figura 36: Nivel de presión sonora en decibelios vista multiplano (A) y vista lateral (B) de Modelo Rectangular.	72

Figura 37: Presión sonora en pascales visto en FEM (A) y en decibelios (B) en Modelo Ranura Corta.....	74
Figura 38: Presión sonora multiplano en decibelios de Modelo Ranura Corta (A) y en pascales (B).....	76
Figura 39: Gráfico comparativo de las lecturas de cada modelo.....	79
Figura 40 : Esquema modelos con tapa vibratoria.....	80
Figura 41: Representación del Modelo Ranura Larga en Autodesk Inventor.....	81
Figura 42: Plano de medidas del Modelo de Ranura Larga.....	82
Figura 43: Nivel de presión en decibelios multiplano (A) y vista lateral (B) de Modelo Referencia Tapa.....	83
Figura 44: Presión sonora elementos BEM en Pascales (A) y Decibelios (B) de Modelo Ranura Larga.....	85
Figura 45: Nivel de presión sonora en decibelios mostrada en dos escalas diferentes con vista lateral de Modelo Ranura Larga.....	87
Figura 46: Gráfico de progresión de potencia sonora en Modelo de Ranura Larga.....	88
Figura 47: Gráfico de progresión de potencia sonora en Modelo Referencia Tapa.....	89
Figura 48: Gráfico comparativo de modelos con tapa vibratoria.....	90
Figura 49: Resultado de tensiones en Modelo Ranura Larga expresadas en pascales.....	91



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Medidas de mayor interés realizadas en Elche.....	37
Tabla 2: Progresión cada medio metro de la presión acústica en los modelos iniciales.....	78
Tabla 3: Progresión de presión acústica en decibelios de Modelo de Ranura Larga y Modelo Final Base.....	82





1 INTRODUCCIÓN

La contaminación sonora hace referencia a los sonidos que sobrepasan las condiciones que se consideran normales o cotidianas en las diferentes zonas de estudio. Esta contaminación la ocasiona en mayor medida el ser humano, siendo muy perjudicial tanto para la salud como para el bienestar de la población. Bajo estas circunstancias se genera el ruido, el cual agrupa a todo sonido desagradable o no deseado por la sociedad.

Existen medidas y ordenanzas que ayudan a controlar este tipo de contaminación. Estas medidas se regulan a través de normativa específica publicada, tanto por la Unión Europea como por España, teniendo como objetivo fundamental reducir los niveles de las emisiones sonoras y evitar así problemas que se puedan ocasionar en el ser humano. Las fuentes principales de ruido son: el tráfico, las industrias y las obras públicas.

La Organización Mundial de la Salud ha establecido 70 dBA como límite de inicio de las emisiones sonoras consideradas perjudiciales para la salud. Rebasar este límite supone exponer a la población a posibles problemas en la capacidad auditiva, así como a posibles trastornos fisiológicos y psicológicos, dificultando así la garantía de que el ser humano pueda llevar una vida saludable.

En la actualidad, la emisión sonora producida por el tráfico rodado es una de las causas de ruido más habituales y predominantes, tanto en entornos urbanos como interurbanos.

El ruido emitido por un vehículo está generado por varias tipologías de fuentes que a su vez se pueden agrupar en tres categorías principales:

- Los producidos por el motor y sistema de tracción.
- Los producidos por la interacción neumático / pavimento (Rodadura).
- Los producidos por la aerodinámica del vehículo.

Con el auge de las motorizaciones híbridas y eléctricas del parque automovilístico actual y futuro, se ha logrado minimizar en gran medida las emisiones sonoras procedentes del motor, contribuyendo a mejorar los ambientes sonoros en las ciudades y conseguir un incremento, tanto en la calidad de vida, como en la salud de los ciudadanos. Este cambio sin duda representa una gran mejora en la contaminación acústica de los entornos urbanos.

Por otro lado, este cambio en las motorizaciones de los vehículos ha generado algunos problemas en la seguridad vial, como, por ejemplo, una reducción en su detectabilidad. Para subsanar este problema se han creado sistemas de advertencia a bordo en los vehículos (AVAS). Estos sistemas se encargan de generar un ruido que se asemeja al de un vehículo de combustión interna en el momento en el que acelera, este sistema lo podemos encontrar por ejemplo en el Nissan Leaf, el cual emplea dos tonos simples que intentan encajar con el sonido natural de un motor de combustión, estos tonos se modifican para generar un efecto de aceleración. El problema que surge con este sistema es que, en entornos con un nivel de ruido alto, su percepción es bastante deficiente. Además, el sonido sigue sin ser totalmente familiar para los peatones, lo que puede producir que no asocien el sonido al de un vehículo.

Estudios recientes han demostrado que, el riesgo de sufrir accidentes con vehículos eléctricos es mayor que en los vehículos convencionales de combustión interna [1]. De hecho, muchas aseguradoras han empezado a mostrar preocupación por este motivo. Este riesgo extra, en comparación con los automóviles de combustión se debe a varias causas, como por ejemplo la entrega inmediata de potencia, hecho que puede provocar errores humanos en el manejo del vehículo, aunque una segunda posibilidad es que, debido a la gran reducción de emisiones sonoras que se ha conseguido con las nuevas motorizaciones eléctricas, hacen que en entornos urbanos donde existe un ruido ambiente notablemente alto sea complicado percibir la presencia de estos vehículos. Aunque esto puede parecer un beneficio para la contaminación acústica en las ciudades, supone que los peatones o el tráfico próximo es incapaz de notar la presencia del vehículo y como resultado sufrir una colisión con este.

1.1 OBJETIVO DEL ESTUDIO

Como se ha descrito anteriormente, la carencia de ruido en los vehículos de nueva generación en entornos donde existe tráfico, tanto peatonal como rodado, puede presentar un riesgo en la identificación de los vehículos llegando incluso a provocar accidentes. Aunque en la actualidad existan sistemas como el AVAS mencionado anteriormente y que pretende conseguir un sonido similar al causado por un vehículo de combustión, la posibilidad de sufrir accidentes por los vehículos eléctricos sigue siendo demasiado elevada en comparación a los vehículos de combustión interna, por lo que, para prevenir este riesgo, es fundamental realizar un estudio de las diferentes fuentes sonoras que puedan ser empleadas para una mejor percepción de los vehículos.

Por tanto, el objetivo de este trabajo de fin de grado se describe como: el profundo estudio y diseño de meta superficies para pavimentos, que hagan posible la identificación de los vehículos eléctricos e híbridos, mediante emisiones acústicas, producidas por la interacción neumático / pavimento.

Para conseguir este objetivo será esencial cumplir diferentes objetivos parciales, estos se pueden enumerar como:

- 1) Estudio de la acústica en la rodadura.
- 2) Establecimiento de los valores fijos de cálculo.
- 3) Diseño de diferentes modelos, partiendo de los más básicos (Modelos de Referencia).
- 4) Análisis de los modelos empleando el cálculo por FEM (Elementos Finitos) y BEM (Elementos de Contorno).
- 5) Análisis y comparación de los diferentes resultados.

Sergio Núñez Andrés

La Universidad Miguel Hernández de Elche, cuenta con una extensa experiencia en el área de la investigación sobre la rodadura de los vehículos, y ha dado soporte a todos los estudios realizados para este trabajo.



2 RUIDO EN VEHÍCULOS

2.1 GENERACIÓN DEL RUIDO

El ruido o emisión sonora producida por un vehículo se compone de tres fuentes simultáneas:

- Ruido mecánico
- Ruido aerodinámico
- Ruido producido por la rodadura.



Figura 1: Esquema de fuentes sonoras de un automóvil.

Además, depende de los siguientes factores:

- Características propias de la carretera.
- Velocidad del vehículo.
- Características del neumático

- Características del vehículo
- Motorización.
- Y estado general del vehículo y características aerodinámicas.

Todos estos factores modificarán el comportamiento o interacción del pavimento / neumático, es decir, la rodadura.

2.1.1 RUIDO MECÁNICO

El ruido mecánico es producido por los movimientos generados en el motor, así como por cualquier elemento mecánico que posea el vehículo.

Una característica de esta tipología de ruido es que suele ser el más habitual a velocidades bajas, por ejemplo, cuando circulamos por el centro de la ciudad suele ser el más notable para el resto del tráfico.

Los elementos más habituales que intervienen en este tipo de emisión sonora son:

- Sistema de frenado.
- Sistema de admisión.
- Sistema de escape.
- Motor del vehículo.

Existen algunos factores en esta categoría, como el ruido del motor, que ha sido objeto de numerosos cambios y mejoras introducidas por las nuevas motorizaciones eléctricas las cuales por ejemplo no tienen proceso de combustión, gracias a la entrada en el mercado de estas nuevas motorizaciones eléctricas e híbridas, motivando la reducción de las emisiones sonoras propias del motor, a niveles realmente bajos y al cambio en los sonidos con los que la sociedad estaba familiarizada al pensar en un vehículo.

2.1.2 RUIDO AERODINÁMICO

El ruido aerodinámico en los vehículos puede ser producido por múltiples componentes, los cuales, al entrar en contacto con el aire producen perturbaciones o turbulencias.

Esta tipología de ruido puede ser más notable en vehículos de mercancías como por ejemplo camiones en los que la aerodinámica no es igual de pensada para alcanzar un buen coeficiente aerodinámico como para disponer de un espacio de carga amplio y útil.

En las últimas generaciones de vehículos, se ha intentado perfeccionar la aerodinámica y el diseño por medio de numerosas simulaciones y análisis a fin de entender lo máximo posible la interacción entre el flujo de aire que atraviesa el vehículo y las líneas de diseño de este a fin de reducir al mínimo las interacciones o perturbaciones vehículo-aire, consiguiendo así minimizar la resistencia al avance por efectos aerodinámicos, mejorando el consumo, la eficiencia y la durabilidad del vehículo.



Figura 2: Aerodinámica de un vehículo [2].

2.1.3 RUIDO DE RODADURA

El contacto entre el neumático y la calzada produce una interacción al rodar la cual da lugar a un gran número de fenómenos físicos, esto tiene una importante contribución en la emisión acústica del vehículo, además esta es dependiente de la velocidad a la que se circule y del tipo de calzada por el que se desplace.

El avance en los motores de propulsión híbrida y eléctrica ha minimizado la emisión sonora del motor, que, junto con la continua mejora de la aerodinámica de los vehículos, ha llevado a la rodadura a ser una de las fuentes principales de emisión sonora.

Este hecho convierte a la rodadura en una herramienta potente para desarrollar sistemas de emisión acústica en las nuevas generaciones de vehículos, la cual servirá de sistema de advertencia e identificación de estos para el resto del tráfico.

2.2 MECANISMOS DE GENERACIÓN DE RUIDO EN LA RODADURA

El ruido de la rodadura se genera por medio de diversos mecanismos de generación de ruido, habitualmente se suelen clasificar en un total de 4 grupos genéricos:

- Ruido por vibraciones.
- Ruido por adhesión.
- Ruido por impacto.
- Ruido por efectos aerodinámicos.

En primer lugar, se debe tener en cuenta la **generación mecánica ocasionada por vibraciones**. Los constantes impactos que tienen lugar en la huella de contacto entre neumático y calzada durante su desplazamiento provocan una serie de vibraciones, que, combinadas con la acción del aire en las cavidades del neumático, genera el ruido por rodadura.

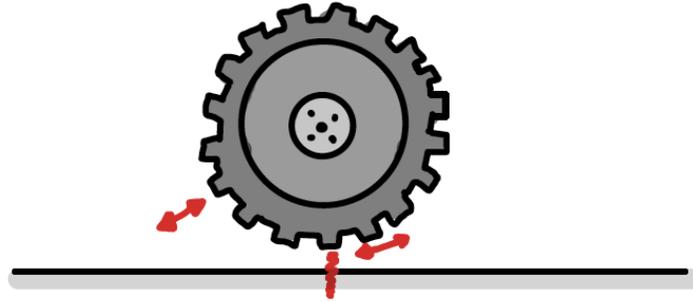


Figura 3: Generación de ruido por vibraciones.

Debido a estas vibraciones y dado a que el neumático se encuentra completamente relleno de aire, se producen diversas variaciones de presión en el aire que se encuentra en su interior. Como resultado de ello, el neumático sufre diversos cambios de presión que se suceden a medida que se desplaza sobre el pavimento girando sobre la superficie, esto da lugar a un fenómeno de resonancia basado en un efecto de soplado y succión de aire en las diferentes cavidades del neumático en la huella de rodadura, provocando una emisión sonora característica en dirección longitudinal.

Durante el movimiento del neumático, su superficie de contacto se separa continuamente de la calzada, lo que produce que el aire que contenía sea absorbido y expulsado continuamente, este hecho se denomina **Air Pumping o Bombeo De Aire**, el cual se da lugar en dos fases, la acumulación del aire en la huella de contacto y su posterior expulsión.

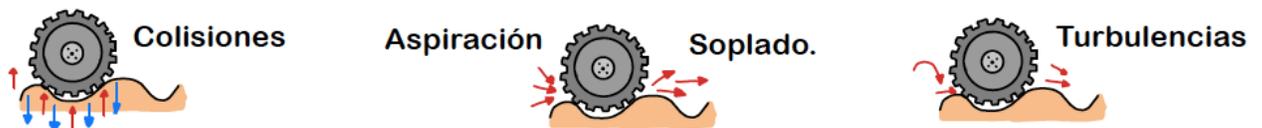


Figura 4: Mecanismos de generación de ruido en la rodadura. Fuente: elaboración propia.

Es importante tener en cuenta las fuerzas de fricción en el contacto entre neumático y pavimento, debido a esto se puede observar un efecto llamado **Slip-Stick**, el cual se puede describir como el movimiento entre dos superficies que tienden tanto a adherirse como a deslizarse, esto se debe a que las fuerzas de fricción no son lo suficientemente fuertes para hacer frente a las fuerzas laterales, lo que causa que haya un cambio repentino entre fricción estática y dinámica de forma constante, esto produce un cambio espontáneo en la velocidad en la que gira.

Debido a los diferentes impactos y a las vibraciones provocadas, la tensión en la banda de rodadura oscilará entre valores máximos y mínimos. Las propiedades elásticas del neumático causan que estos impactos den lugar a ciertas deformaciones en la forma de este.

La generación de ruido en la rodadura depende de manera importante de las propiedades físicas tanto del neumático como de la propia calzada. A medida que se desplaza el neumático sobre esta, se crean caminos en la huella de rodadura por los que el aire es capaz de circular, esto a su vez da lugar a la generación de sonidos.



Figura 5: Fuentes de ruido en la rodadura. Fuente: elaboración propia.

El **Horn Effect (Efecto Bocina)**: El "efecto bocina" se produce cuando la superficie de contacto del neumático con la carretera se deforma de manera no uniforme, creando una

forma de "bocina" o "cono" en la huella de contacto. En este caso, la forma de la huella de contacto no es plana, sino que se curva hacia adentro o hacia afuera en los bordes.

Este efecto puede tener varias consecuencias en el comportamiento de rodadura del neumático. Por ejemplo, si la forma de la huella de contacto se curva hacia adentro en los bordes, se puede generar un desgaste irregular en los hombros del neumático. Por otro lado, si la forma de la huella de contacto se curva hacia afuera en los bordes, puede reducirse la superficie de contacto efectiva, disminuyendo la tracción y la estabilidad del neumático.

Para evitar o reducir el efecto bocina, es importante mantener los neumáticos correctamente inflados, ya que una presión inadecuada puede contribuir a la deformación no uniforme de la huella de contacto. Además, el diseño y la estructura del neumático también pueden influir en la aparición de este fenómeno. Los fabricantes de neumáticos buscan minimizar el efecto bocina mediante el desarrollo de perfiles y compuestos adecuados que promuevan una distribución uniforme de presiones y una forma plana de la huella de contacto.

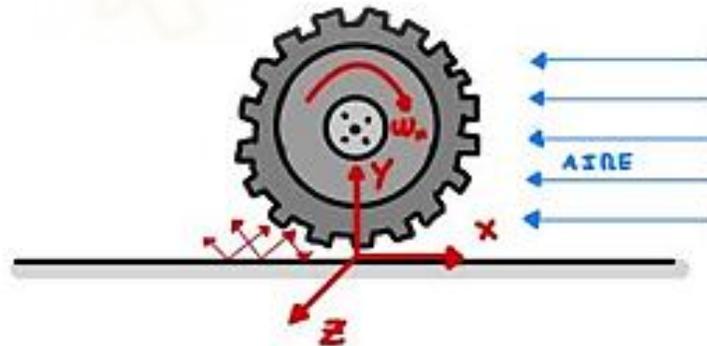


Figura 6: Efecto Bocina o Horn Effect.



3 MÉTODOS DE ESTUDIO Y EVALUACIÓN DEL RUIDO DE RODADURA

3.1 METODOLOGÍAS ESTANDARIZADAS DE MEDICIÓN DEL RUIDO DE RODADURA

En la actualidad contamos con diferentes métodos normalizados [3] para la medición del ruido de rodadura, podemos realizar una gran diferenciación a la hora de hablar de la medición del ruido de rodadura, ya que desde un punto de vista práctico encontramos dos puntos de interés:

- 1- Ruido de rodadura en el neumático.
- 2- Ruido de rodadura en el pavimento.

El interés de la primera reside en el estudio de los diversos neumáticos y poder realizar una diferenciación y clasificación de ellos, siempre sobre un pavimento o superficie genérico o normalizado, por el contrario, el interés en analizar el ruido de rodadura en el pavimento va dirigido hacia la construcción de las carreteras, y a la importancia de conocer cómo actúa cada tipo de pavimento en la interacción neumático / pavimento, al contrario que en el primer punto, aquí la variable a utilizar es el pavimento y la constante o elemento normalizado haría referencia al neumático.

Una de las intenciones al realizar las medidas por medio de diversos métodos es poder hacer comparativas para garantizar la correcta ejecución de los resultados. Para ello contamos con varios métodos de medida normalizados o estandarizados como, por ejemplo:

- 1- Método Close-Proximity (CPX)
- 2- Coast-By (CB)
- 3- Statistical Pass-By (SPB)
- 4- Controlled Pass-By (CPB)

El **Método Close-Proximity** es uno de los más utilizados en la investigación de los diferentes tipos de pavimentos y sus propiedades, en ella se registran los niveles sonoros en un área muy próxima al neumático.

El **Método Coast-By**, establecido en Europa como método estándar en homologación de neumáticos analizando las emisiones sonoras de rodadura, las cuales regula el Reglamento 117 de la Comisión Económica Europea, consiste en el registro de niveles sonoros provenientes del neumático durante su paso por los diferentes micrófonos.

El **Método Statistical Pass-By** es muy parecido al método Coast-By, pero como indica su nombre, se realiza aplicando el tráfico considerado normal el cual se encuentra circulando a una velocidad que permanece constante y un régimen normal del motor. El objetivo que persigue este método es obtener los niveles de presión sonora mediante el uso de micrófonos situados en ambos extremos de la calzada, a una distancia de 7,5 metros del centro longitudinal de la calzada.

El **Método Controlled Pass-By** es idéntico al Statistical Pass-By [4] pero prefijando los vehículos a utilizar antes de realizar la medición, se trata de un método muy poco extendido. La razón de usar este método es poder evaluar diferentes pavimentos mediante el ruido que genera el paso de un número prefijado de vehículos.

Todos los métodos mencionados anteriormente sufren un gran problema y es que están muy influenciados por los factores meteorológicos. Los más influyentes en este trabajo centrado en el diseño de metasuperficies aplicado a las calzadas van a ser el **Método Close-Proximity (CPX)** y el **Statistical Pass-By (SPB)**.

3.1.1 Método Close-Proximity (CPX)

El método CPX tiene como objetivo proporcionar mediciones de ruido de rodadura reproducibles y comparables entre diferentes neumáticos. Estas mediciones son utilizadas por organismos reguladores y fabricantes de neumáticos para evaluar y clasificar los niveles de ruido de rodadura de los neumáticos según las normativas y estándares establecidos.

La norma ISO en la que se basa es la ISO 11819-2, en ella se establece que para conseguir realizar la medición de presión sonora de un neumático al desplazarse (rodar) se utilizarán como mínimo 2 micrófonos y con un máximo de hasta 6.

Respecto a la elección del neumático y su posición, es importante saber que se dispone de varias configuraciones aceptadas y validadas, aunque la más empleada suele ser instalar un neumático en un remolque diseñado específicamente para el ensayo a realizar, este remolque va dotado de un material que absorbe el ruido, aunque siempre será menos preciso que en el caso de no utilizar remolque [5].

Durante esta prueba es importante la función de la distancia utilizada, la cual puede ser elegida o aleatoria, y la velocidad que lleva el vehículo, para alcanzar la velocidad deseada podemos escoger dos vías diferentes, dotar al vehículo de medida de un sistema de propulsión que le permita alcanzar la velocidad deseada o utilizar otro medio para poder remolcar el vehículo de medida hasta la velocidad necesaria.

Al aplicar este método se consigue medir y analizar los niveles de presión sonora, una vez tenemos la colección de datos podemos proceder a su análisis.

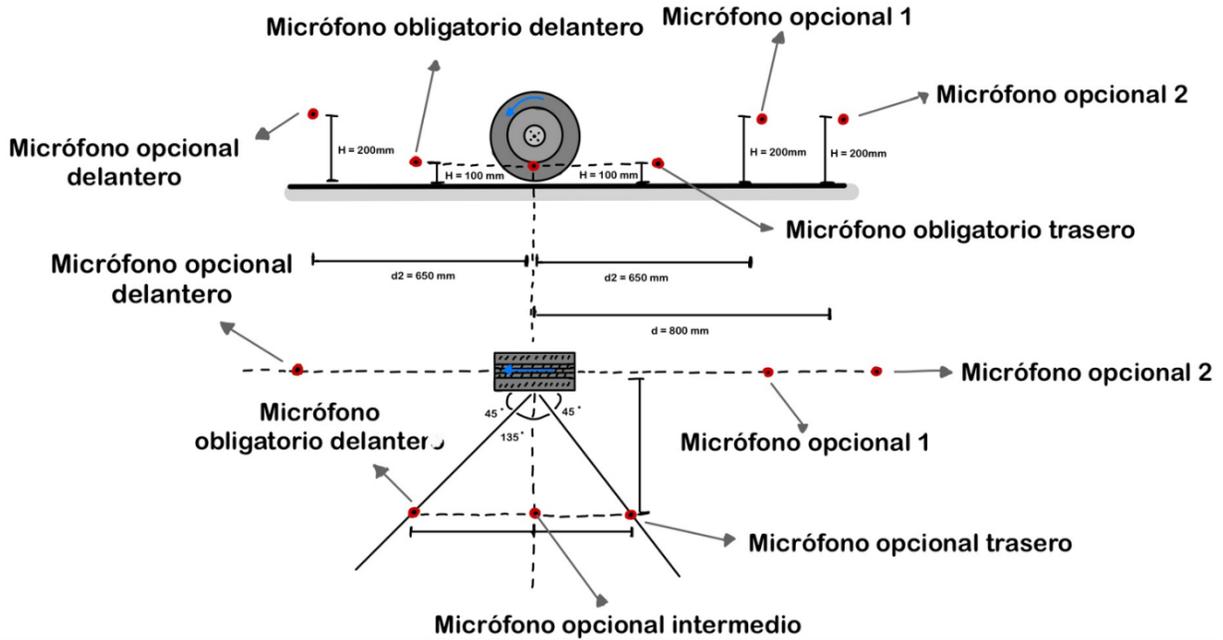


Figura 7: Posiciones de los micrófonos para el ensayo CPX. Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Statistical Pass-By :

Se trata de un método que persigue la misma finalidad que el Coast-By, es decir, obtener los niveles de presión sonora a través del uso de diversos micrófonos ubicados a cada lado del pavimento y a 7,5 metros de su eje longitudinal.

Este método es adecuado para medir el ruido del tráfico (en condiciones normales de funcionamiento) total que atraviesa un espacio de pavimento, además también resulta muy útil para poder llegar a realizar una comparativa visual de los resultados obtenidos en diferentes tipos de pavimentos.

Para realizarlo se ha de seguir un procedimiento en el que se emplearán diferentes herramientas y accesorios destinados a realizar medidas acústicas, los más importantes a la hora de llevar a cabo el estudio con su respectiva toma de medidas serán:

- 1- Sonómetro.
- 2- Trípode.
- 3- Metro.

Según el continente en el que se realice el estudio, se aplicará la siguiente normativa:

- En **Estados Unidos**: se usará una distancia de 15 metros.
- En **Europa**: siguiendo la normativa ISO se aplicará una separación de 7,5 metros.

Para una correcta toma de medidas se deben respetar ciertas normas, estas son: considerar como referencia el punto central de la vía de tráfico y asegurar una altura del micrófono respecto al suelo de 1,2 metros. Una vez preparada la instrumentación se harán pasar por el punto de medida un número de vehículos, no es imprescindible que sean de la misma clase, es decir, vehículos ligeros, pesados, entre otros.

Si la zona en la que se toman las medidas presenta una gran reflexión del ruido, se debería instalar el micrófono sobre un panel reflectante, aunque esta solución presentaría un problema, reduciría la eficacia o la precisión de los datos.



Figura 8: Método Statistical Pass-By [6].

Existe una variante proveniente de este método llamada Controlled Pass-by (CPB), esta técnica emplea la misma metodología y procedimientos, pero aplicando un tráfico controlado en lugar de uno aleatorio. Consiste en tomar varias medidas del mismo vehículo pasando y siempre permaneciendo en las mismas condiciones.

3.2 METODOLOGÍAS NO ESTANDARIZADAS

Con el paso de los años, los métodos de evaluación de ruido de rodadura han ido evolucionando, a la vez que se han ido incorporando nuevas técnicas que buscan mejorar o proporcionar una respuesta más precisa a las necesidades del personal investigador y de las empresas, para ello, estas técnicas se van haciendo cada vez más complejas con el fin de paliar o subsanar los posibles errores o carencias de las técnicas más antiguas.

Podemos realizar medidas en laboratorio, aunque uno de los puntos importantes para tener en cuenta es que en este espacio las condiciones serán más controladas debido al uso de

cámaras anecoicas o semi-anecoicas y disponer de un mayor control del ambiente de medida, el cual es necesario muchas veces.

Entre las más destacadas están algunas de las utilizadas en estudios de laboratorio como, por ejemplo:

3.2.1 Laboratory Drum (DR): es una técnica utilizada para medir y evaluar el ruido de rodadura de los neumáticos en un entorno de laboratorio controlado.

En este método se utiliza un dispositivo llamado tambor de laboratorio o rueda de prueba de rodadura, que consiste en un cilindro de acero giratorio con una superficie similar a la de una carretera. El neumático para evaluar se monta en el tambor y se realiza una prueba de rodadura en condiciones específicas. Durante la prueba, se mide el ruido generado por el neumático mientras rueda sobre la superficie del tambor. Se utilizan micrófonos colocados en posiciones predeterminadas para capturar el sonido producido. El neumático se somete a diferentes velocidades, cargas y condiciones de inflado, y se registran los niveles de ruido resultantes.

Los datos recopilados en este tipo de pruebas se utilizan para comparar y clasificar los neumáticos en función de su rendimiento de ruido, y para cumplir con los estándares y regulaciones establecidos por organismos reguladores.

La diferencia entre la superficie usada en el método Drum y la realidad es que en la primera se considera una superficie regular con deformaciones periódicas y en el caso real nunca lo será ya que presentará irregularidades [7].

Este método se puede dividir en 3 categorías:

- **Tambores de rotación interna:** el neumático apoya sobre la cara interior del tambor.

- **Tambores de rotación externa:** en este tipo, el neumático no posee desplazamiento, pero la cara externa del tambor en la que apoya se encuentra girando.
- **Tambores estáticos:** el tambor permanece inmóvil, pero a diferencia de los otros dos métodos, ahora el neumático es el que gira apoyado en la cara externa del tambor.

3.2.2 Far-field Acoustic Array Technology (FAAT):

Es una tecnología utilizada para la medición y análisis del ruido generado por los neumáticos durante la rodadura. Esta tecnología se basa en el uso de matrices acústicas de campo lejano para capturar y procesar las señales acústicas emitidas por los neumáticos en movimiento.

En lugar de realizar mediciones en condiciones controladas de laboratorio o en un entorno específico, como en el método de tambor de laboratorio, FAAT se utiliza en situaciones de rodadura real, como en carreteras o pistas de prueba. Se despliega una matriz de micrófonos en una configuración específica, generalmente a cierta distancia del neumático en movimiento, para capturar el sonido emitido.

La matriz de micrófonos de campo lejano permite registrar y analizar las ondas acústicas generadas por el neumático a medida que se mueve. Utilizando técnicas de procesamiento de señales, se puede extraer información sobre el nivel de ruido, la distribución espectral y otras características acústicas del neumático en diferentes condiciones de rodadura.

La ventaja de la tecnología FAAT es que proporciona mediciones en un entorno más realista, lo que permite evaluar el rendimiento acústico de los neumáticos en condiciones más cercanas a las situaciones reales de conducción. Esto puede ayudar a los fabricantes de neumáticos a desarrollar productos más silenciosos y a cumplir con los estándares y regulaciones relacionados con el ruido de rodadura.

Esta técnica emplea micrófonos situados en la carretera en lugar de en el vehículo. Se han presentado 3 modos diferentes de aplicar esta técnica:

- Pass-By Acoustic Holography (PAH) Method (Yang, 2011 [8]).
- PBN beamforming (PNB) method (Fonseca and Gerges, 2010 [9]).
- Moving Frame Acoustic Holography (MFAH) (Park and Kim, 2001 [10]).

El método Pass-By Acoustic Holography es capaz de eliminar el efecto Doppler del dominio tiempo, al ser este un método teórico, los resultados se validan mediante test realizados con altavoces en movimiento, aunque esta técnica encuentra su tope a una velocidad máxima del vehículo de 244 km/h.

El método PNB es ideal para estudiar la distribución de la fuente de sonido durante la pasada de un vehículo, para ello se emplean micrófonos situados sobre una base hecha de un material metálico e interconectados por cable a la central de toma de datos [11].

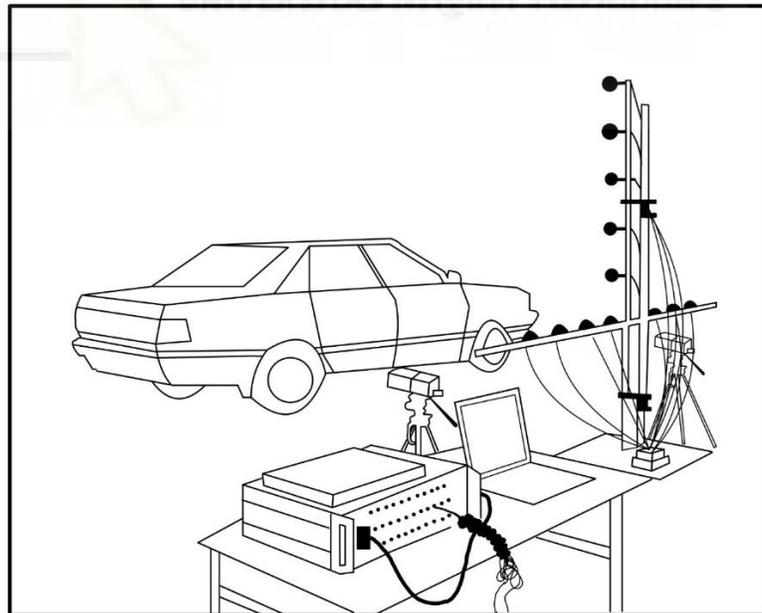


Figura 9: Equipo en cadena para desarrollar el estudio de campo sonoro lejano. Fuente: adaptado de [12].

La técnica Beamforming es capaz de caracterizar distintas fuentes acústicas diferenciando los niveles sonoros basándose en la dirección donde se originen [13][14].

El método MFAH utiliza un número total de 16 micrófonos distribuidos en posición vertical con una separación entre ellos de 10 cm y de 5 cm con respecto al suelo desde el micrófono situado a la posición más cercana a este [15]. Esta técnica consigue representar el ruido tanto de las ruedas como del motor durante la pasada del vehículo.

3.2.3 Near-field Acoustic Array Technology (NAAT):

Este método tan solo se utilizado en aplicaciones con fines de investigación, es decir, no es una técnica empleada en pruebas reales de circulación. Se forma por una red de micrófonos que se posicionan rodeando el costado del neumático con el fin de crear un campo acústico [15]. Esta técnica se puede dividir en 3 categorías:

- NAH convencional.
- Técnicas de configuración temporal.
- Función de respuesta de frecuencia inversa (IFRF).



Figura 10: Near-Field Acoustic Array Technology (NAAT) [16]

3.2.4 The vibration Measurement (TVM):

Se trata de una técnica realmente útil para poder obtener el valor del ruido durante la interacción neumático / pavimento, en ella se realiza un estudio tomando como elemento foco las vibraciones, otra posible utilidad de esta técnica es analizar distintas fuentes de emisión de ruido [17].

Dentro de esta técnica existen diferentes formas de realizarse:

- **Laser Doppler Vibrometer (LDV):** está técnica es capaz de provocar vibraciones en la superficie de estudio sin ningún tipo de contacto físico con ella a través de un láser con una frecuencia determinada dirigida hacia la superficie, posteriormente se realizan los cálculos basándose en un fenómeno físico denominado el efecto Doppler, en concreto, el efecto Doppler del láser reflejado por la vibración provocada en la superficie.
- **Mediante un acelerómetro:** se trata de otra técnica o forma de medir las vibraciones que tienen lugar en el neumático, consiste en posicionar estratégicamente una serie de dispositivos denominados acelerómetros, los cuales como su nombre sugiere, se ocupan de medir aceleraciones en los costados del neumático implementándose directamente en el objeto que vibra [18], lo que le permite convertir la energía de vibración en una señal eléctrica que es proporcional a la aceleración momentánea del neumático.

Estos métodos se realizan en interiores, es decir, en laboratorios, este es un dato importante para tener en cuenta en ambos métodos, una ventaja de realizarse en interior es no tener que preocuparse por los factores medioambientales que podrían producir la cancelación de las pruebas, aunque, por el contrario, las pruebas en interior no proporcionan los resultados más aproximados a la realidad ya que no llegan a cumplir todas las propiedades que se dan en el exterior.

3.3 MODELACIÓN DEL CONTACTO NEUMÁTICO / PAVIMENTO

A la hora de hablar del rendimiento y las capacidades dinámicas de un vehículo, es imprescindible tener en cuenta las fuerzas y momentos que tienen lugar durante el contacto entre neumático y pavimento, es de suma importancia admitir que durante el rodado de los neumáticos estos se van a enfrentar a numerosas irregularidades del terreno que van a ocasionar deformaciones en la superficie de estos, estas deformaciones van a resultar en una variedad de fenómenos físicos entre el pavimento y el neumático.

A lo largo de los años, se han ido desarrollando modelos de estudio para conseguir entender y modelar esta interacción fundamental para el correcto rendimiento de un vehículo. Estos modelos permiten dar una explicación a lo sucedido en la realidad mediante el uso de expresiones matemáticas, además, nos permitirán predecir el comportamiento del neumático.

Es importante conocer una serie de variables que tendrán un papel importante durante el proceso del cálculo matemático como las fuerzas tanto longitudinales y laterales, momento autoalineante, ángulos de deriva, deslizamiento y fuerzas dirigidas verticalmente.

Debido a las diferentes variables tanto externas como internas que presenta el análisis del comportamiento del neumático, se han asumido una serie de simplificaciones con el fin de simplificar la aplicación de estos modelos.

El desarrollo de los modelos de estudio se divide en diferentes etapas, en primer lugar, su finalidad era comprender la causa de las fuerzas cortantes y momentos en el contacto neumático/pavimento, posteriormente se mejoraron para introducir en el cálculo ciertos parámetros físicos de neumáticos, y en su etapa final estos modelos fueron mejorados con el fin de emplear factores de medida para obtener los resultados más parecidos posibles a los datos de ensayo [19].

Podemos clasificar los modelos existentes en 3 categorías:

- 1- **Modelos Empíricos o Semiempíricos:** se basan de forma exclusiva en experimentos sobre neumáticos, es decir, describen el comportamiento del neumático mediante expresiones matemáticas.

- 2- **Modelos Físicos:** para su cálculo se tiene en cuenta la estructura física y las propiedades del neumático [20]. Este tipo de modelos proporcionan un análisis muy detallado de cómo se comporta el neumático cuando se encuentra en desplazamiento, estos se suelen emplear para el diseño de neumáticos.

Un punto en contra de este tipo de modelos es que no resultan eficientes en el cálculo dinámico del vehículo. Entre ellos destacan los basados en elementos finitos.

- 3- **Modelos analíticos:** la función de los modelos analíticos es ser capaces de calcular las fuerzas que tienen lugar en el neumático durante su desplazamiento, además realizan una estimación de sus características elásticas mediante el empleo de las matemáticas [21]. Presentan el inconveniente de ser bastante complejos para el desarrollo del cálculo. Estos modelos se basan en 4 pilares:
 - Distribución de presiones en la huella de contacto.
 - Comportamiento de la banda de rodadura.
 - Comportamiento del cinturón y carcasa.
 - Propiedades friccionales neumático/calzada.

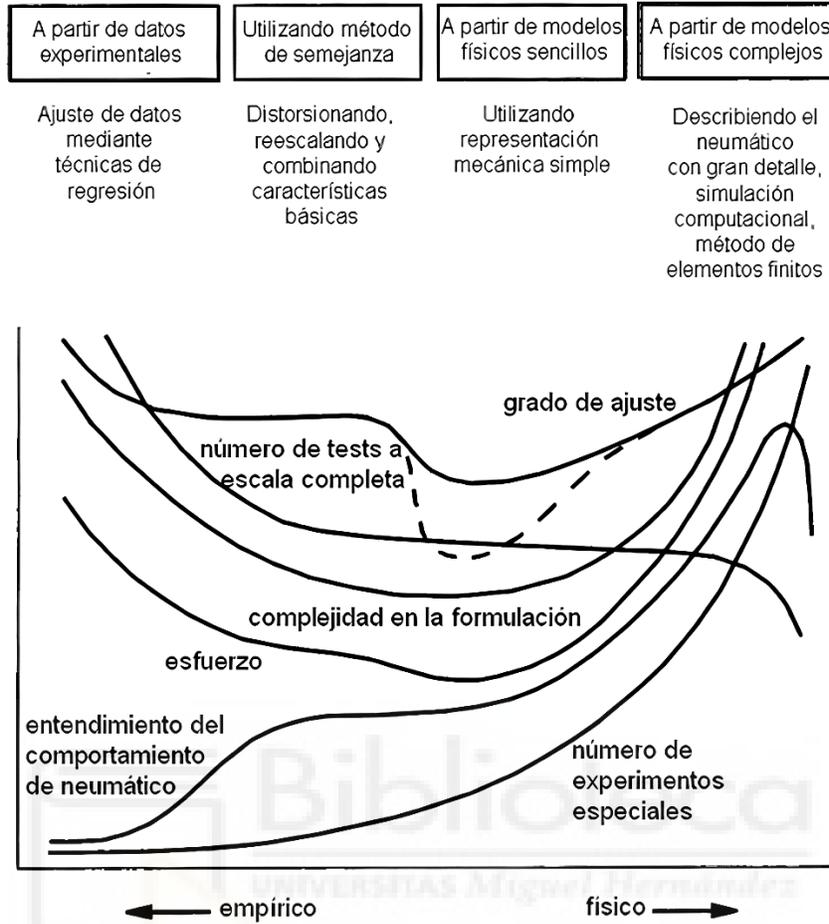


Figura 11: Clasificación de modelos de neumáticos [22].

Durante la década de 1940, se creó un modelo que se enmarca en los primeros, este se denominó Modelo *Brush* y su autor fue Fromm y Julien [23]. Este modelo ha sufrido de varias renovaciones en su estructura para poder adaptarse a las continuas necesidades y a los nuevos avances que van surgiendo con el paso del tiempo, aun así, se reconoce como uno de los modelos más aceptados en el ámbito científico. Su intención es poder considerar la interacción o contacto entre neumático y pavimento como un conjunto de diminutos espacios llamados celdas, estas se verán sometidas a una variedad de esfuerzos que ocasionarán deformaciones de tipo elásticas tanto en dirección transversal como longitudinal. Una simplificación realmente importante que lleva a cabo es considerar la huella de contacto como una geometría rectangular, de esta forma se anulan todas las posibles deformaciones del neumático.

En el año 1981 se añadió una nueva modificación que le permitiría deducir una expresión para la fuerza lateral en la huella de contacto, dependiente de: ángulos de caída, ángulos de deriva y caída en dirección vertical.

El modelo propuesto por Fiala, basado en el modelo de Brush, introduce simplificaciones adicionales para facilitar los cálculos y reducir la cantidad de datos de entrada necesarios.

Estas simplificaciones incluyen:

1. Desplazamiento lateral limitado a la huella de contacto: El modelo asume que el desplazamiento lateral del neumático solo ocurre dentro de la huella de contacto, es decir, en el área de contacto entre el neumático y la superficie de la carretera. Esto implica que el neumático no se desliza lateralmente fuera de esta área.
2. Huella de contacto rectangular con distribución de presiones uniforme: El modelo considera la huella de contacto como una forma rectangular y asume que la distribución de presiones dentro de esta área es uniforme. Esta simplificación permite simplificar los cálculos relacionados con la distribución de presiones en la huella.
3. Descarte del ángulo de caída: El modelo no tiene en cuenta la influencia del ángulo de caída, que es el ángulo entre la vertical y el eje de rotación del neumático. Esta simplificación implica que no se considera la inclinación lateral del neumático al calcular las fuerzas y momentos.

La ventaja principal del modelo de Fiala es que requiere solo 10 datos de entrada relacionados con las propiedades físicas del neumático, lo que facilita su aplicación. Sin embargo, este modelo es útil solo en situaciones de sollicitaciones simples, ya que no tiene en cuenta factores importantes como el momento autolineante (que tiende a enderezar las ruedas), la variación de la rigidez a la deriva con un ángulo de deriva igual a cero y las fuerzas transversales. Estos factores pueden desempeñar un papel significativo en situaciones más complejas de manejo y tracción de vehículos.



4 ANTECEDENTES

4.1 FIRMES SUPERFICIALES QUE ACTÚAN COMO FONOEMISSORES

Es importante definir el término fono emisor, el cual hace referencia a cualquier actividad u objeto capaz de generar una emisión acústica.

Un firme superficial es un conjunto de materiales que forman capas granuladas, normalmente reciben algún tipo de tratamiento, estos forman una superficie por la cual, en este caso, permitirá a los vehículos circular con seguridad y comodidad. Estos se pueden clasificar en 4 tipos:

- **Flexibles:** este tipo de firme está formado por gránulos no tratados que forman capas y pavimento bituminoso, es decir de color oscuro derivado del alquitrán, el espesor del pavimento será menor a 15 centímetros.
- **Semiflexibles:** se trata de un tipo de firme formado por varias capas de mezcla bituminosa, con un espesor en este caso superior a 15 centímetros.
- **Semirrígidos:** se trata de un firme superficial formado por un pavimento bituminoso con un espesor cualquiera posicionado encima de máximo dos capas de conglomerantes hidráulicos tratadas anteriormente. El espesor conjunto de estas capas debe de ser mayor o igual a 20 centímetros.
- **Con pavimento de hormigón:** se trata de una especie de firme constituido por varias losas de hormigón las cuales darán lugar al pavimento, estas se encuentran divididas por juntas, aunque también se puede dar el caso de haber una losa continua de hormigón armado. Para instalar el hormigón se requiere de maquinaria pesada de obra.

Como se ha mencionado con anterioridad, el interés de este trabajo de fin de grado es poder diseñar un firme superficial o pavimento capaz de emitir un sonido que alerte al tráfico peatonal y rodado de la presencia de un vehículo en movimiento.

En la actualidad se puede encontrar una gama muy variada de pavimentos destinados al tráfico, por ejemplo en las zonas más antiguas o habilitadas al tráfico pero con preferencia peatonal podemos encontrar carreteras compuestas de adoquines, firme muy interesante por el sonido que emite un vehículo al pasar sobre ellos, aunque por otro lado presentan grandes desventajas como su poco agarre cuando el suelo está mojado y la incomodidad que presenta para los pasajeros del vehículo, además un uso prolongado puede afectar al funcionamiento del vehículo.

Otros tipos de pavimento diferentes al de uso cotidiano son los usados para condiciones meteorológicas adversas como puede ser la lluvia o la nieve, normalmente estos reciben algún tipo de tratamiento superficial.

En los últimos años se han desarrollado pavimentos con algunas modificaciones que permiten que durante la interacción neumático/pavimento se emita algún tipo de emisión acústica, un ejemplo de ello son las carreteras musicales, las cuales presentan un firme normal, pero a la zona superficial o pavimento se le han hecho algunas hendiduras de distancia controlada mediante un molde de metal muy caliente, estas hendiduras van a provocar un reparto de presiones controlado en el neumático del vehículo (a una velocidad determinada) haciendo posible que suene una canción. Una desventaja de esta técnica es que para poder funcionar necesita que el vehículo vaya a una velocidad determinada, la cual suele ser demasiado alta para los centros de ciudades, que es precisamente donde más riesgo existe para los peatones.



Figura 12: Musical Road in Lancaster, California [24].



5 HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Para poder analizar de una manera más realista y visual los sucesos físicos que ocurren en la interacción neumático / pavimento se ha utilizado un variado equipo que contiene tanto aparatos electrónicos como un software de cálculo, diseño y simulación de resultados.

5.1 COMSOL MULTIPHYSICS

El software que se ha utilizado para dar forma a este trabajo es el programa COMSOL, en el cual se ha realizado un primer diseño del sistema con una parametrización muy exhaustiva que permite poder variar las dimensiones del pavimento y de la superficie sonora de manera rápida y sencilla, posibilitando poder variar su forma en función de los resultados obtenidos, para poder aumentar el efecto deseado.

Para poder realizar la simulación y el cálculo del sistema se han tenido que especificar las interacciones físicas que se dan durante el contacto neumático / pavimento, para ello ha sido imprescindible diferenciar entre los elementos a los que se aplica el cálculo de elementos finitos (FEM) y aquellos a los que se encajan dentro del cálculo de elementos de superficie (BEM).

El cálculo de los resultados de los diferentes modelos estudiados se ha realizado por dos métodos, en el primer método se ha empleado una fuente artificial monopolar que simula el ruido producido por un vehículo a 20 km/h, esta velocidad ha sido la escogida para el presente estudio debido a que es una de las más habituales en los lugares de riesgo de zonas urbanas, para calcular la potencia sonora del vehículo a esta velocidad ha sido necesario saber la presión sonora expresada en decibelios que emite un automóvil a 20 Km/h.

En un estudio previamente realizado [24] en donde se calculan los decibelios emitidos por un vehículo a diferentes velocidades, se puede ver que la velocidad buscada no aparece, pero el mismo artículo ofrece una fórmula que permite realizar ese cálculo:

$$LW_{A-CPX-II @315 - 4000 Hz} = 21,0 + 39,9 * \log(v) \quad (1)$$

Aplicando esta formulación se puede llegar a la conclusión de que un vehículo circulando a 20 km/h emitiría 73 dB, convirtiendo este resultado a unidades de potencia o watos a través de la siguiente expresión donde W_0 es una constante igual a 10^{-12} :

$$L_w = 10 * \text{Log}\left(\frac{W}{W_0}\right) \quad (2)$$

El resultado obtenido por esta ecuación nos proporciona una potencia sonora de 0,00002 Watos, esta cifra será la que se usará como potencia de la fuente sonora en los diferentes modelos.

Otro factor importante para tener en cuenta ha sido la elección de la frecuencia en los diferentes casos a estudiar, esta frecuencia ha sido fijada en 1000 Hz debido a que esta es audible para el ser humano y además la frecuencia de rodadura de los vehículos se encuentra muy cercana a esta, otra razón ha sido que el software empleado solo permite introducir frecuencias discretas, por lo que 1000 Hz ha resultado ser la opción más lógica y realista.

El segundo método empleado ha sido asemejar el paso del vehículo por medio de una fuente vibratoria, es decir una tapa con una determinada aceleración normal, para esta aceleración se ha empleado la que sufre un neumático en una condición normal de funcionamiento.

5.2 AUTODESK INVENTOR

Este software ha sido esencial tanto para entender el planteamiento del sistema como para la modelización de las diferentes opciones de diseño.

Una herramienta muy útil dentro de este programa es la parametrización, la cual nos ayuda a variar las dimensiones y las formas de las diferentes geometrías de forma rápida y sencilla. A su vez, todo el repertorio de herramientas de modelado 3d que contiene este

software hacen que la simulación y representación gráfica de los sistemas sea sencilla y muy acertada en cuanto a calidad de visualización.

El uso de este programa ha pasado por varias fases durante la realización del presente trabajo, la primera fue una modelización general de tres tramos de carretera con los pasos de peatones representado al final de cada tramo, cada uno de ellos contenía un modelo diferente, esta fase ayudó a entender tanto el funcionamiento como la posición que tendría que adaptar cada uno de ellos.

5.3 SONÓMETRO Y EQUIPO DE MEDIDA

Para conseguir tener una idea de que cantidad de ruido emitido por el tráfico rodado existe en las zonas de ciudad se ha hecho uso de varias herramientas:

- 1- Sonómetro.
- 2- Trípode.
- 3- Calibrador.
- 4- Software de descarga de datos.
- 5- Estación meteorológica portátil.

Sonómetro: esta herramienta se usa para obtener un variado repertorio de resultados relacionados con el sonido, en este caso se empleó la función llamada Registro Sonómetro Mejorado. El sonómetro empleado en este trabajo se denomina con el código 2250 y es de la marca Brüel & Kjaer, se compone de varias partes, la principal y más representativa de él es el micrófono, este puede estar fijado en la parte frontal de la herramienta o extendido gracias a una alargadera con un micrófono instalado al final de ella, en cuanto a la parte de este con la que podemos tanto visualizar resultados, como configurar e interactuar con este es la pantalla, en el caso del sonómetro utilizado en este trabajo es una pantalla táctil.



Figura 13: Sonómetro Empleado.

La configuración escogida para la realización de este trabajo fue de medidas de 10 minutos de duración.

Trípode: El trípode fue imprescindible para poder sujetar el sonómetro e impedir cualquier movimiento que interfiriera con la medida, la altura escogida para este trabajo es de 1,5 metros de altura y una separación con respecto a la fachada más próxima de más de 4 metros.

Calibrador: el calibrador consiste en un pequeño aparato electrónico que se ancla al micrófono del sonómetro y por el cual se emite un sonido con una frecuencia de 1000 Hz. Una vez se conecta a este, se realiza una medida de 1 minuto tanto antes de empezar a medir como al finalizar las mediciones y se comprueba que el resultado obtenido se encuentre entre 93,4 y 94 decibelios, si es así entonces el sonómetro funciona correctamente.

Software de descarga de datos: este programa informático permite que una vez conectado el sonómetro al ordenador se puedan visualizar y descargar las medidas en el ordenador para poder analizar los resultados mediante una serie de gráficas a las diferencias bandas de frecuencia, en nuestro caso el software empleado fue el propio de la marca del sonómetro.

Estación Meteorológica Portátil: este elemento analiza la velocidad del viento, temperatura y humedad, parámetros muy críticos a la hora de realizar medidas de calidad en el exterior. Una vez realizadas las medidas climáticas se anotan en una ficha para poder tener constancia del ambiente que había durante cada medida. También es importante destacar que si la velocidad del viento asciende de 5 m/s no es posible realizar medidas, ya que el viento podría afectar a estas.

5.4 MEDIDAS DE INTERÉS OBTENIDAS

En la tabla se puede observar una serie de medidas tomadas in situ en diferentes ubicaciones de Elche, para ello se ha hecho uso de todo el material explicado anteriormente, además se siguió un proceso de verificación tanto antes como después de la toma de medidas para asegurar un correcto funcionamiento del sonómetro.

Todas las mediciones tomadas han tenido una duración de 10 minutos a intervalos de 5 segundos.

Tabla 1: Medidas de mayor interés realizadas el Elche

ELCHE	MEDICIÓN		TRÁNSITO	PAVIMENTO
Calle	LAeq M	LAeq T	Mucho/Poco	Tipo
Av. Universidad (C. Idiomas)	68,26	65,56	75	Asfalto
Av. Universidad (Innova)	69,68	68,95	69	Asfalto
Av. Universidad (Locomotora)	70,04	70,87	87	Asfalto
Plaza del Congreso Eucarístico	53,57	55,06	1	Adoquines

Las zonas escogidas como representativas de los diferentes entornos de una ciudad son la Avenida de la Universidad, donde se tomaron 3 puntos distanciados a unos 200 m entre ellos y una medida en la Plaza del Congreso Eucarístico, en todos los casos con el sonómetro a 1,5 m de altura y con duración de 10 minutos.

La diferencia entre estas dos ubicaciones es la cantidad de tráfico tanto peatonal como rodado, en la primera ubicación, existe un gran número de coches durante la toma de medidas, mientras que en la Plaza del Congreso Eucarístico solo existe ruido provocado por algún coche perteneciente a organismos de seguridad y limpieza junto con las personas que caminan por el entorno.

Otra diferencia para destacar es que en la Avenida de la Universidad se tiene un pavimento de hormigón como las carreteras convencionales mientras que en la segunda ubicación existe un pavimento peatonal.



Figura 14: Sonómetro realizando una medición en Plaza del Congreso Eucarístico.

6 ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

En este trabajo se han realizado varios modelos con el fin de poder observar las variaciones entre ellos, estos modelos han tenido un objetivo común, pero han sufrido cambios en dimensiones y en geometrías, lo que ha permitido analizar el comportamiento de todas ellas y comprender como amplificar el sonido de una manera más eficaz.

6.1 MODELOS ENSAYADOS

Durante la primera fase de diseño se pusieron sobre la mesa diferentes geometrías, desde las más sencillas hasta las más complejas, siempre buscando que permitieran actuar como un elemento resonador para incrementar el sonido.

Modelo de Referencia

El primer modelo, y el más básico de ellos fue analizar el comportamiento de una superficie lisa totalmente reflectante de 4 m de largo y 1 m de ancho al someterla a una potencia sonora ubicada en el punto central de una esfera de 5 cm de radio y a 5 cm de altura con respecto del suelo tal y como indica el CNOSSOS.

Este modelo inicial va a servir como referencia de partida para evaluar los posteriores modelos y saber argumentar si incrementan o no los niveles de presión sonora.

La idea principal de este diseño es simular una carretera lisa sin ningún tipo de meta superficie en ella, esto hace posible el estudio y análisis del modelo más básico.

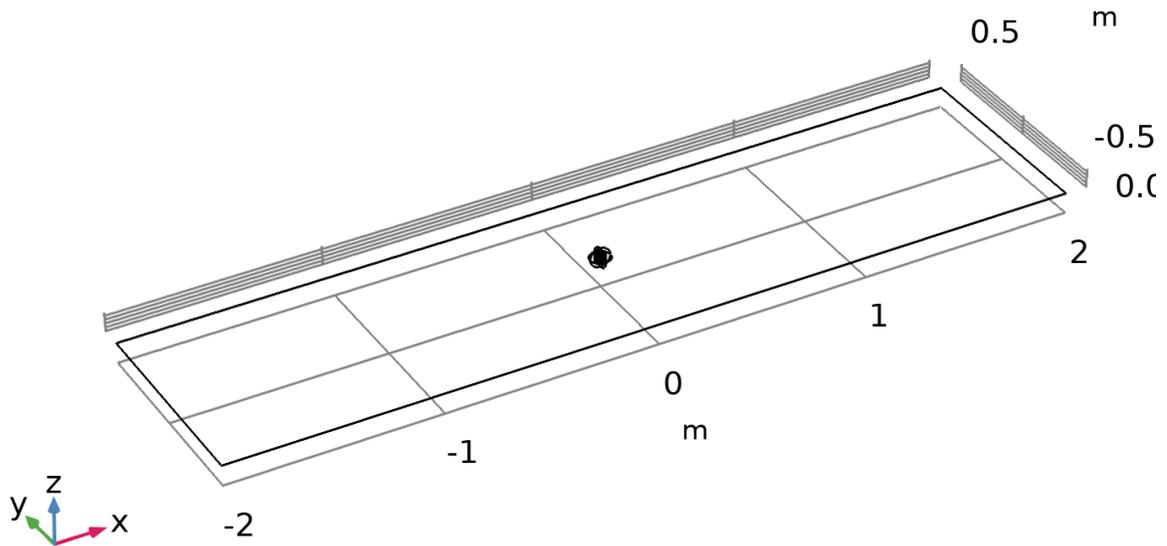


Figura 15: Modelo ideal geometrías.

- **Configuración:**

Para conseguir esta primera simulación se hizo uso de CNOSOS, en donde se especifica que la fuente de sonido debe estar en el interior de una esfera de radio arbitrario y a una altura respecto del pavimento de 5 cm. Para implementar la fuente sonora se ha hecho uso de una herramienta de Comsol llamada fuente de punto monopolar, esta herramienta permite asignar a un punto anteriormente creado en el diseño la capacidad de convertirse en una fuente sonora a la que se le ha dado una potencia de 0,00002 mW la cual se corresponde con la potencia sonora de un vehículo a 20 km/h, además como se ha dicho anteriormente este punto o fuente sonora se encuentra contenida en el centro geométrico de una esfera.

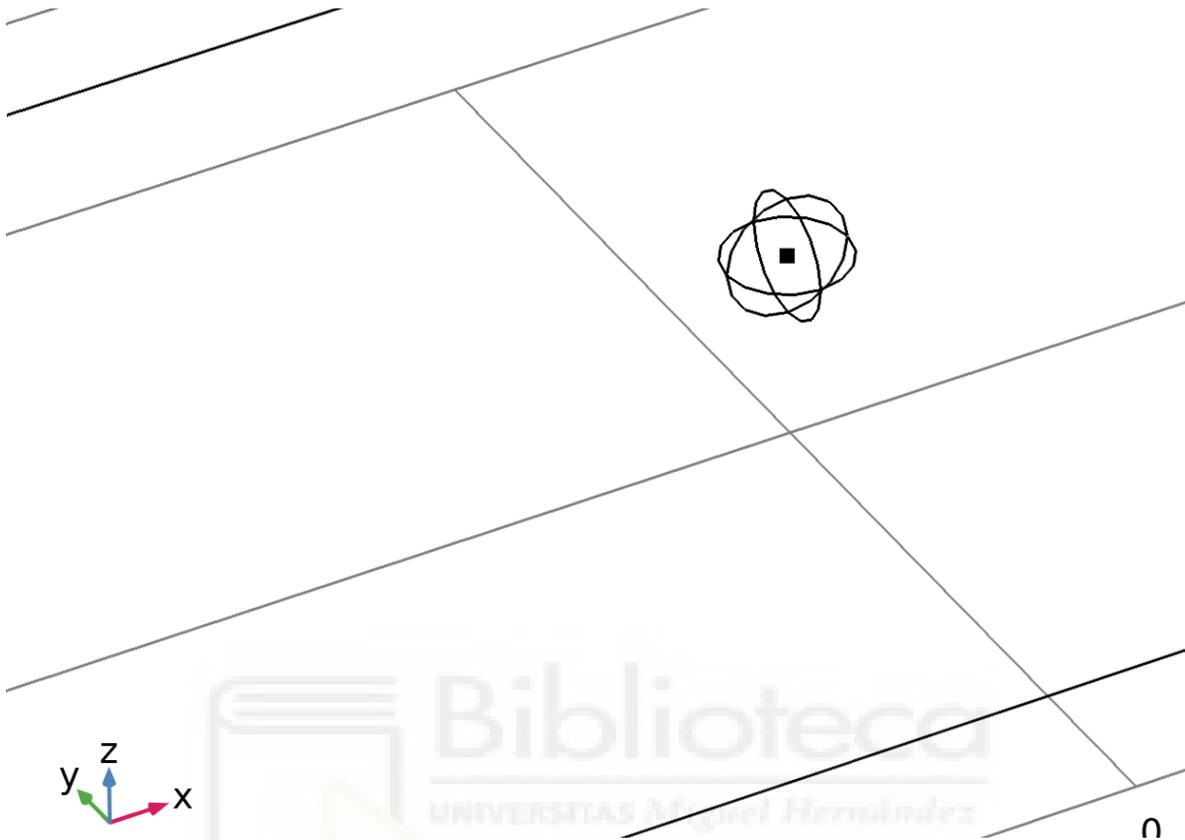


Figura 16: Esfera con punto en el centro.

Un aspecto muy importante a la hora de realizar el proyecto ha sido definir los elementos que pertenecen al cálculo de elementos finitos (FEM) y los que de elementos de contorno (BEM), para ello se ha definido el pavimento como elemento de contorno con superficie totalmente reflectante y los huecos de las pequeñas geometrías como elementos finitos, por otro lado, la esfera que contiene aire en su interior se ha calculado como elementos finitos, y la carcasa que rodea este aire como elemento de contorno. Por último, se ha tenido que crear una especie de tapas que simulan la capa de contacto entre el cálculo BEM del aire del espacio infinito exterior y el FEM del interior de las geometrías.

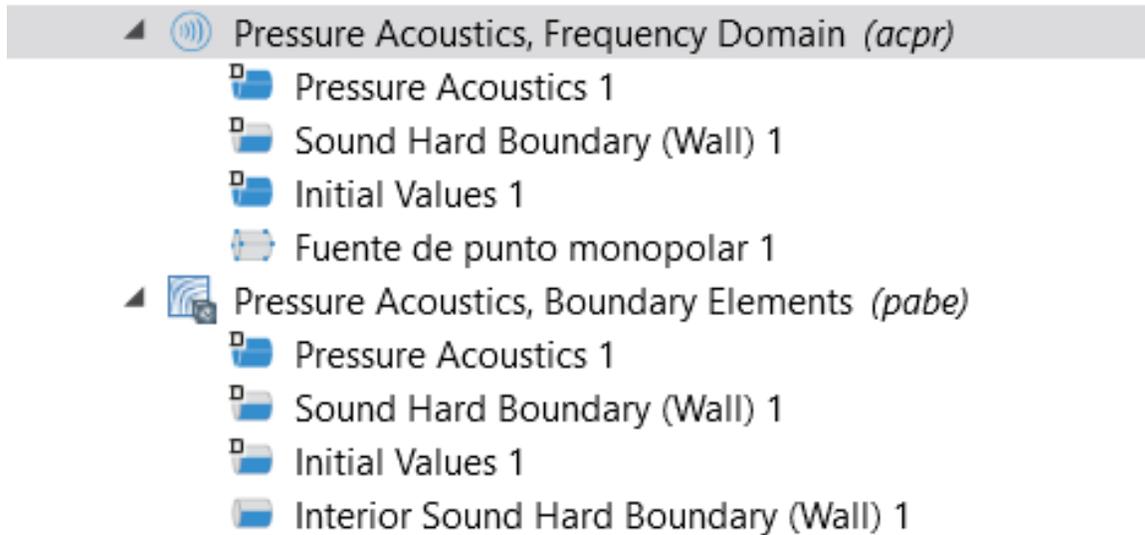


Figura 17: Selección de elementos FEM y BEM.

El siguiente paso ha sido crear la malla de todos los elementos del proyecto, en este apartado se ha tenido que realizar una diferenciación entre los diferentes elementos intentando dejar la mayor precisión posible para obtener los resultados más precisos. En este trabajo el tipo de malla más empleado ha sido la de geometría triangular. Una configuración importante que se ha realizado es intentar implementar el máximo número de particiones o celdas en la malla con la intención de obtener el modelo de simulación y los datos más exactos posibles, esto ha supuesto un incremento en tanto la memoria consumida durante el cálculo como un mayor tiempo de procesamiento en comparación con cuando se emplea una malla con celdas de mayor tamaño y por tanto menos precisas, es por ello que se ha tenido que minimizar el número de geometrías en los diferentes modelos para ser capaces de conseguir finalizar el cálculo en un tiempo razonable y sin que surjan problemas debido a la memoria del ordenador.

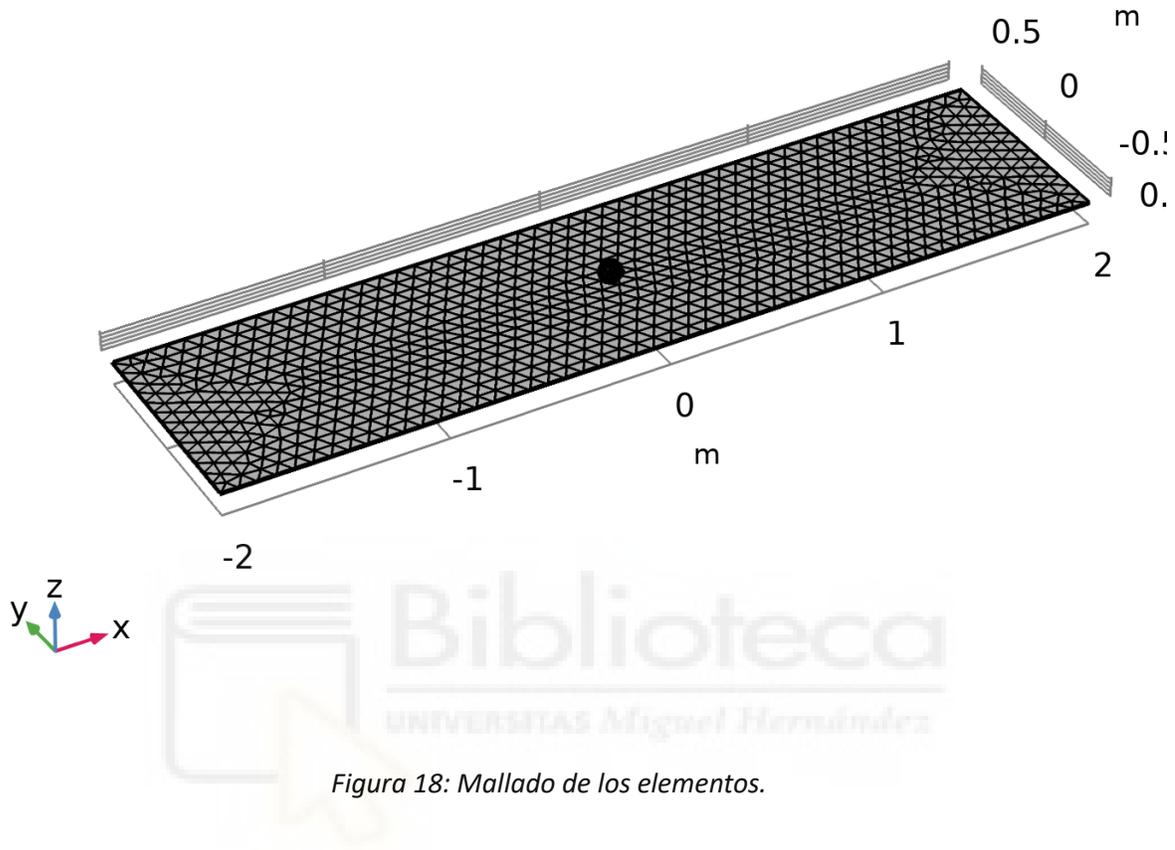


Figura 18: Mallado de los elementos.

Como último paso se deben definir los parámetros, así como el tipo de estudios que se desea calcular, para ello se ha empleado la herramienta de estudio seleccionando el apartado de dominio de frecuencia (acpr) y la herramienta presión acústica elementos de contorno (pabe), mediante estas dos herramientas se van a definir las condiciones de estudio y además realizar la discriminación entre los cuerpos o geometrías que se estudian como BEM (Elementos de Contorno) o FEM (Elementos Finitos).

Va a ser dentro de la tipología de Dominio de Frecuencia donde se va a incorporar la fuente sonora monopolar mencionada anteriormente, desde ahí se va a poder seleccionar su ubicación, que en este caso se corresponderá con el punto creado anteriormente y también se podrá configurar con las diferentes opciones que ofrece el programa.

Al proceder al cálculo se pueden observar las diferentes figuras, las cuales se corresponden con diferentes tipologías de resultados de simulación, con sus respectivas diferenciaciones en color que representan los diferentes niveles de medidas. A continuación, se muestra la presión acústica y el nivel de presión sonora a 1000 Hz.

Una vez obtenidos los valores de este primer modelo, se tiene una referencia en las magnitudes de partida, esto es de suma importancia para realizar comparaciones y saber cuándo es necesario descartar, modificar o perfeccionar los diseños.

freq(1)=1000 Hz Multislice: Total acoustic pressure field (Pa)
Surface: Total acoustic pressure field (Pa)

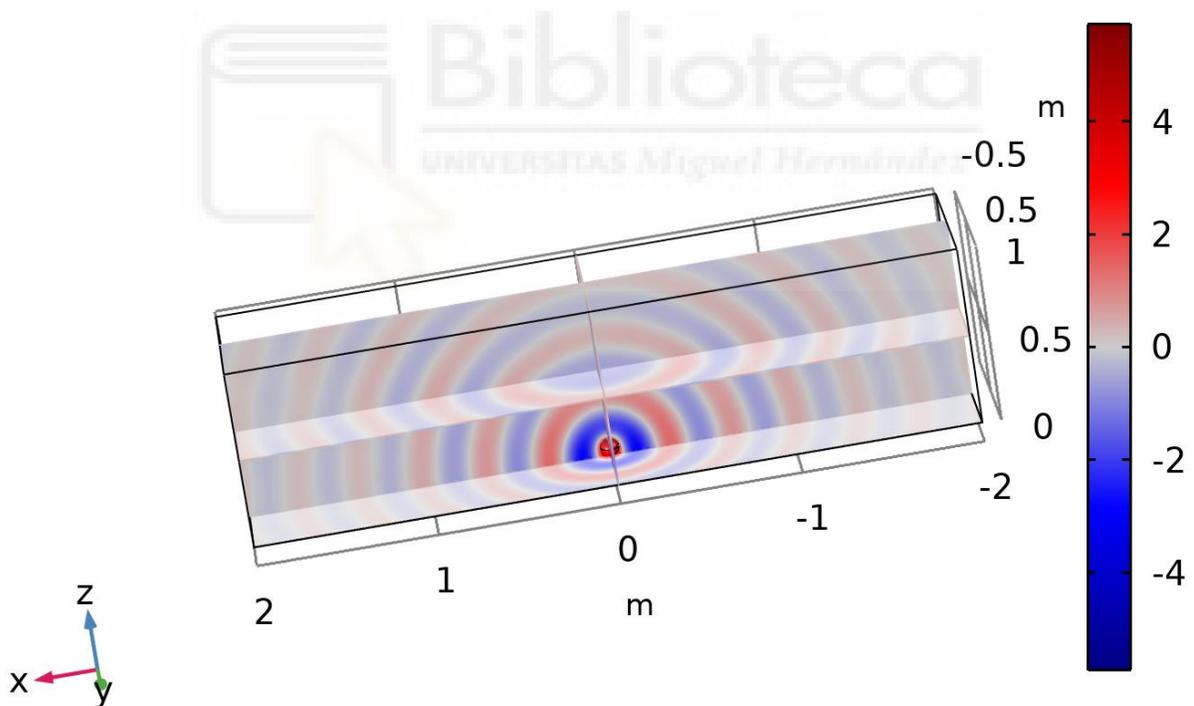


Figura 19: Campo de presión acústica expresada en Pa.

En esta figura se puede analizar de manera visual la presión acústica expresada en pascuales, la leyenda permite identificar de un vistazo los rangos de valores contenidos en el resultado, así como el tono de color asociado a cada resultado numérico. En la imagen se pueden observar diferentes arcos de circunferencia de colores rojos, azules y blancos, estos arcos representan la longitud de onda, también es muy visible que, en la zona central próxima a la fuente sonora, los colores son mucho más vivos y fuertes, mientras que en las zonas más alejadas van desvaneciéndose, esto es debido a que la mayor presión sonora se encuentra justo donde se ubica la fuente.

freq(1)=1000 Hz Multislice: Sound pressure level (dB)
Surface: Sound pressure level (dB)

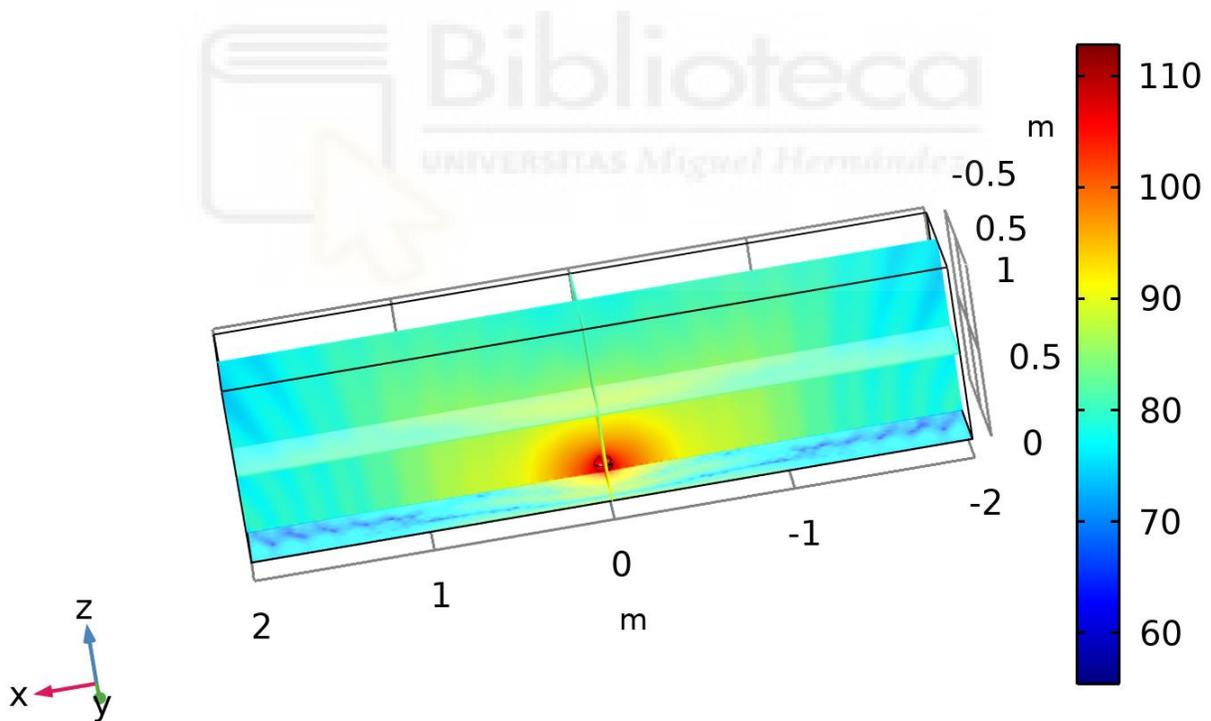


Figura 20: Campo de nivel de presión sonora.

En esta figura se puede analizar de forma gráfica y sencilla la presión sonora expresada en decibelios, como en la anterior figura, se muestra una leyenda que relaciona las tonalidades de colores del gráfico con los niveles de presión acústica en decibelios, además como se puede observar también ayuda a identificar el rango de valores existentes en el resultado, en este caso este rango se encuentra comprendido entre 55 y 115 dB.

Un suceso fácilmente visible es que, en el centro del modelo, es decir, donde se ubica la esfera los niveles son notablemente más altos, esto es debido a que la fuente monopolar está generando esa presión y la zona próxima a ella está directamente expuesta a ella.

Como en la anterior gráfica, las medidas del espacio de estudio son de 1 metro de ancho, 4 m de largo, y 1 m de altura, además es importante señalar que la fuente sonora se encuentra justo en el centro geométrico del diseño.

Modelo 2 Conductos Verticales

En este segundo modelo se partido del modelo de referencia, en él se han labrado varias aberturas de forma cuadrada en el pavimento, estas geometrías se han parametrizado para facilitar su modificación tanto en número de ellas en distribución de columnas y filas, como en las medidas de cada lado de la abertura y profundidad de la abertura en el pavimento, esto permite obtener y valorar diferentes resultados de funcionamiento.

Para un diseño eficiente y seguro para el tráfico se ha tenido muy en cuenta las dimensiones de los cuadrados a fin de evitar que las ruedas de los coches puedan sufrir cualquier tipo de daños al entrar en contacto con ellas, con el fin de evitar un afecto bache al conducir sobre esta meta superficie se ha escogido un tamaño de sus laterales de 3 centímetros.

Para definir la profundidad de los orificios se ha escogido una frecuencia de 1000 Hz, que teniendo en cuenta que la velocidad del sonido es de 343 m/s, dará como resultado una longitud de onda de 34,3 cm o 0,343 metros, medida que se empleará para la profundidad vertical de cada orificio.

A la hora de definir el tipo de cálculo hay que realizar una diferenciación entre las geometrías que van a calcularse como elementos finitos (FEM) y las que van a calcularse como elementos de contorno (BEM), como se ha indicado anteriormente esta diferenciación se llevará a cabo a través de las dos herramientas descritas en el modelo de referencia, estas herramientas son Dominio de frecuencia (acpr) y elementos de contorno (pabe), para este modelo se han establecido como geometrías FEM la esfera que contiene a la fuente monopolar y el interior de los orificios, por otro lado, como elementos de contorno se ha tomado todo el aire que rodea a la geometría de forma externa, es decir el infinito del modelo y la superficie que rodea a la esfera, encerrando el entorno FEM de esta en el interior de esa capa BEM.

Una comprobación visual muy importante es observar si las capas de contacto entre el entorno BEM y FEM están bien definidas, en este modelo esas capas de contacto entre ambos entornos se corresponden con las tapas cuadradas de cada orificio a la altura del pavimento, es decir a nivel de suelo, estas tapas actuarán como una especie de frontera durante el cálculo.

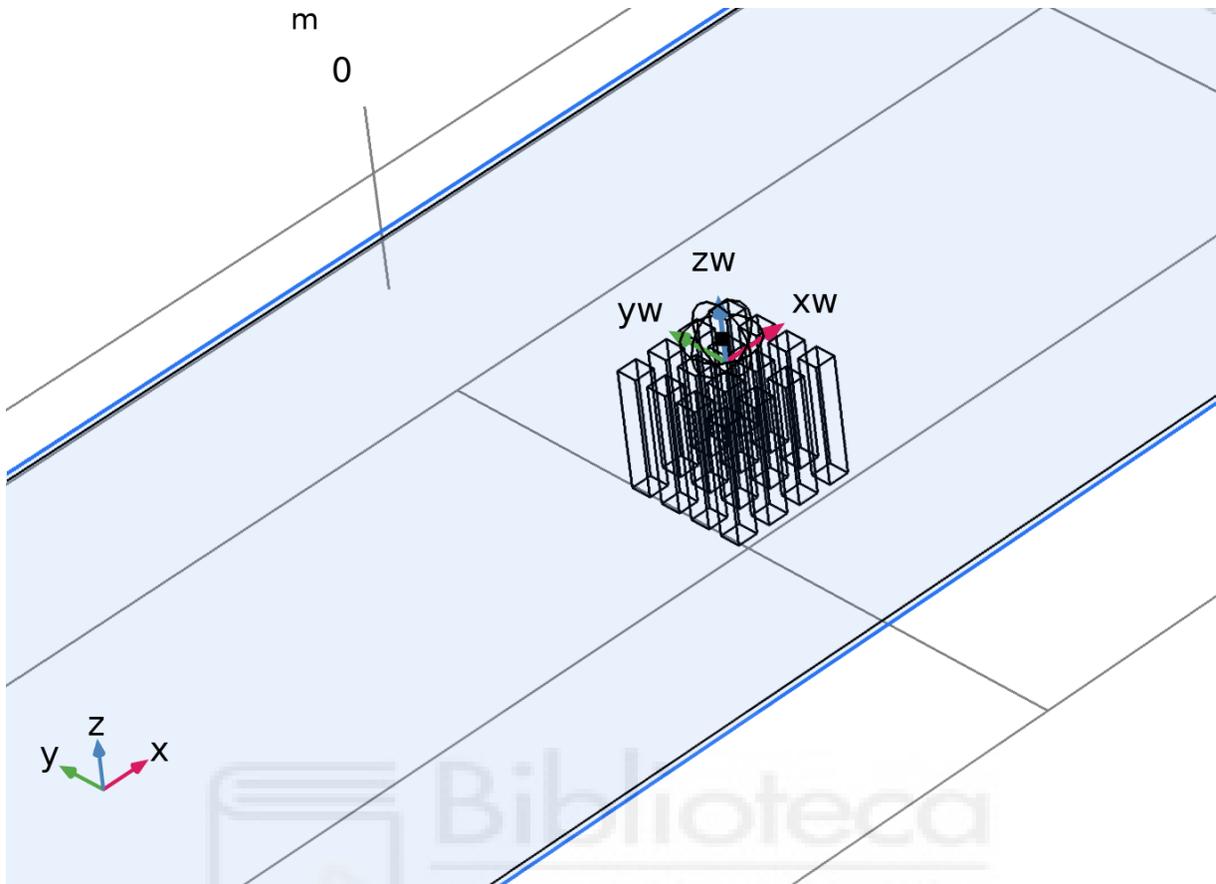


Figura 21: Segundo Modelo o Modelo Conductos Verticales.

Modelo 3 Conductos Horizontales

En este modelo se ha pasado de geometrías cuadradas a geometrías rectangulares, como en la configuración anterior se ha tenido en cuenta la anchura de los neumáticos para que no se dañen al pasar por estos huecos.

En este caso, se le ha dado la longitud de onda al largo del rectángulo en lugar de la profundidad. La configuración general del modelo es básicamente la misma que la del anterior, pero ha permitido apreciar las variaciones que existen al emplear diferentes formas geométricas.

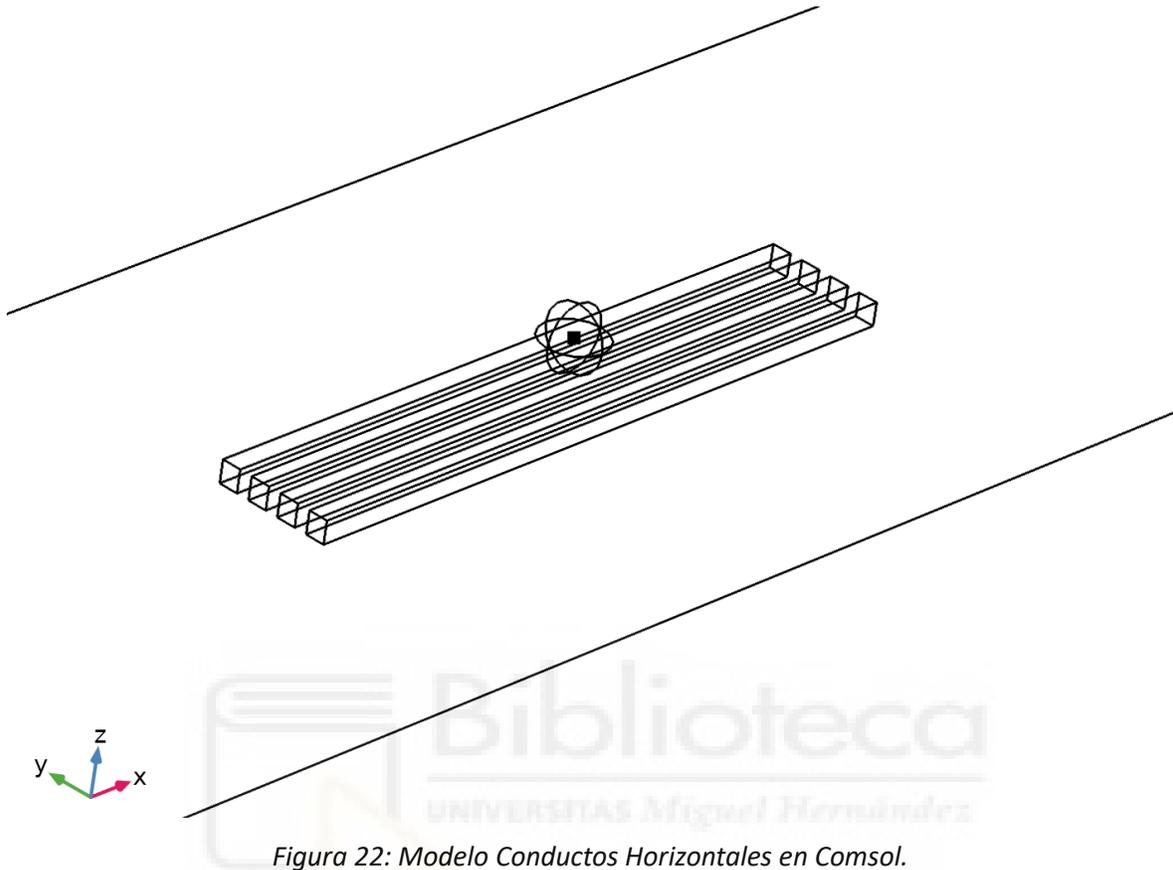


Figura 22: Modelo Conductos Horizontales en Comsol.

En la figura se puede visualizar la forma de la geometría en una representación tridimensional, las dimensiones de las aberturas son de 0,1 metros de profundidad, 0,343 m de largo y 0,03 metros de ancho, como se ha mencionado con anterioridad la longitud de las aberturas se corresponde con la longitud de onda a 1000 Hz.

Modelo 4 Ranura Corta

En este modelo se ha combinado la geometría del 3º modelo con las aberturas del 2º modelo, es decir la última geometría se basa en un hueco en el pavimento de forma rectangular, cubierto por una tapa con resaltes, esta tapa actúa como objeto BEM, es decir elemento de contorno y al igual que el pavimento que lo rodea es totalmente reflectante. También cuenta con dos aberturas de forma cuadrada colocadas una en cada extremo de la

tapa, estas miden 3 centímetros de lado. La función de estas ranuras es actuar como frontera entre el entorno FEM o de elementos finitos que se tiene en el interior de la geometría y el entorno BEM que tenemos en el aire exterior que rodea al modelo.

Los resaltes de la tapa sirven para forzar una frecuencia de 1000 Hz en el interior del modelo, lo que permite que el aire que se encuentra contenido en su interior y el aire próximo a la tapa resaltada se excite y genere una presión sonora que se propagará por la abertura final del modelo.

Al tener un modelo complejo, ya que combina tanto los efectos acústicos como los vibracionales se ha hecho una esquematización o simplificación de los cálculos, es decir, como primera fase se ha diseñado el pavimento como en los primeros modelos y se le ha labrado la geometría deseada.



Figura 23: Modelo de Ranura Corta en Inventor.

Como se puede observar en la figura 24 , el modelo visto en la figura 23 y diseñado en inventor se ha pasado a un diseño más simplificado en Comsol, donde se puede seguir viendo el pavimento reflectante con las mismas dimensiones que en los modelos anteriores, pero ahora con una tapa y dos aberturas en el centro de este.

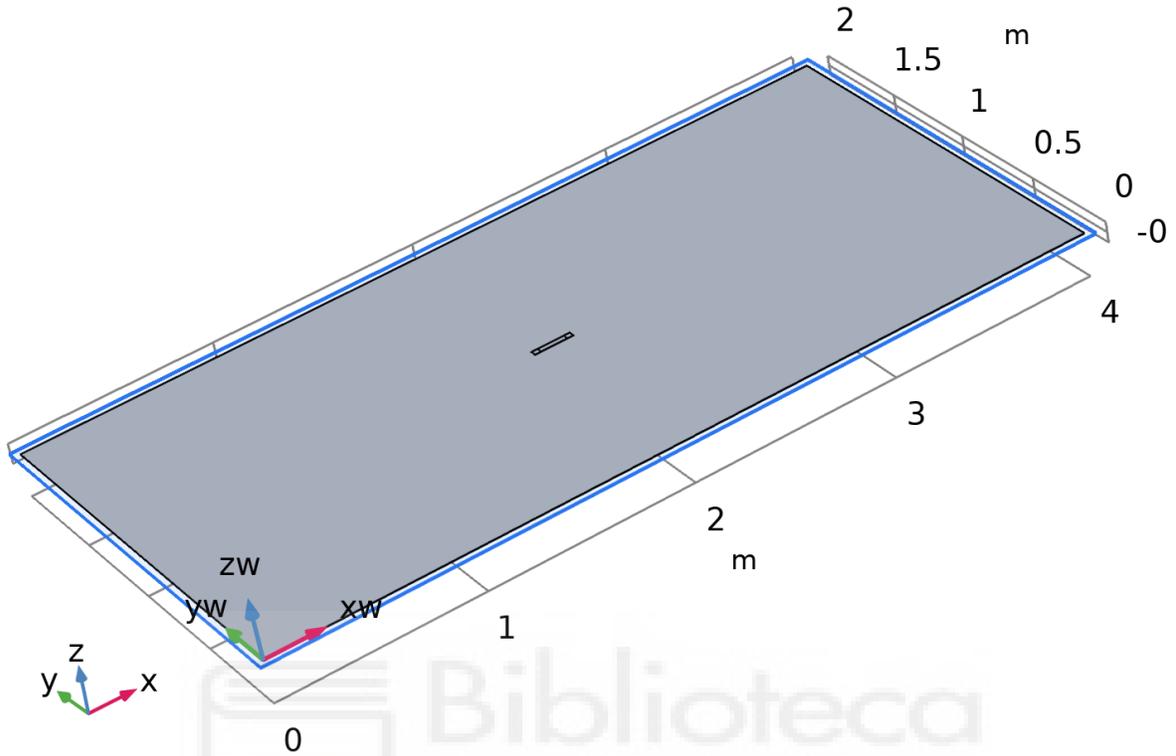


Figura 24: Modelo de Ranura Corta diseñado en Comsol.

La tapa va a ser el elemento vibratorio, simulando una aceleración normal en esta para producir una excitación del aire próximo a ella y dirigirlo hacia las aberturas laterales.

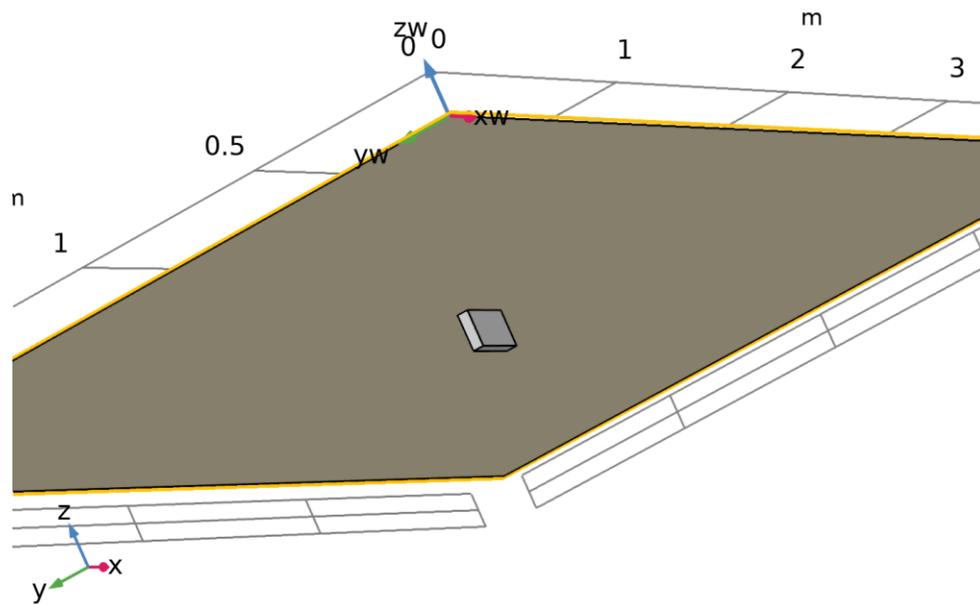


Figura 25: Vista inferior del Modelo de Ranura Corta.

En esta figura se puede ver de manera clara la extrusión inferior en donde se encuentra el aire contenido, este espacio cerrado se va a analizar y calcular como elementos finitos, mientras que las dos aberturas van a actuar como frontera entre el aire exterior (BEM) y el aire interior (FEM).

6.2 PROCESADO DE DATOS Y RESULTADOS

En esta parte del trabajo se indica cómo se ha realizado la parte de procesamiento de datos de cada uno de los modelos, buscando en todo momento obtener los resultados deseados, para ello ha sido necesario ir variando tanto el número de elementos del sistema, la potencia de la fuente, las dimensiones y la frecuencia de la fuente monopolar.

Para esta parte del proceso es de suma importancia tener bien implementada y diseñada la malla en cada una de las geometrías, es importante destacar que la calidad de esta, expresada por el número de particiones y la capacidad de la malla de completar el espacio deseado es lo que va a aportar los valores más aproximados, aunque por el contrario, el

mayor número de particiones que se realicen supondrá una mayor carga de trabajo para el ordenador, resultando así en un mayor tiempo y memoria empleada para el cálculo.

6.2.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para poder analizar de una forma efectiva los diferentes modelos se ha empleado un software llamado COMSOL, gracias a este programa se ha podido diseñar, asignar propiedades físicas al diseño y realizar los cálculos finales de cada modelo de las diferentes características estudiadas.

Durante esta parte del proceso han surgido varios problemas relacionados con la capacidad del ordenador, debido a la cantidad de cálculos que se deben realizar al mallar los elementos del diseño, se han dado ocasiones en las que no ha sido posible llegar al resultado final de la frecuencia deseada, que en este caso es de 1000 Hz.

Para poder realizar un cálculo orientativo se ha disminuido la frecuencia hasta la máxima que el ordenador era capaz de calcular o se ha disminuido el número de elementos manteniendo la frecuencia deseada de 1000 Hz para poder observar de forma exacta cómo se comporta ese tipo de elemento en la frecuencia objetivo. Esta frecuencia se ha escogido puesto que la frecuencia emitida por la rodadura de un neumático en movimiento es muy cercana a 1000 Hz, además en el programa empleado solo se permite poner una frecuencia discreta y la opción más cercana a la realidad resulta ser 1000 Hz.

Una vez realizado el diseño y modelado de los diferentes diseños mencionados en el presente trabajo se ha pasado al procesado de datos. En todos los modelos se ha aplicado una potencia acústica de 0.00002 W, esta potencia se ha calculado siguiendo el estudio ya realizado [21] en donde se presenta una relación entre ciertas velocidades y potencias sonoras en watos, debido a que la velocidad de este trabajo se ha establecido a 20 km/h y esa velocidad no aparece en la tabla proporcionada se ha tenido que calcular mediante la ecuación anteriormente citada, se ha aplicado además el mismo criterio a la hora de decidir

qué elementos se calculan mediante el método de elementos finitos (FEM) y cuales mediante elementos de contorno (BEM).

El criterio seguido para la diferenciación entre FEM y BEM ha sido considerar todos los espacios cerrados como elementos finitos y a todos los elementos externos como el aire exterior como elementos de contorno, además hay que mencionar la presencia de la frontera entre el entorno BEM y el entorno FEM, esta frontera la podemos ver en las tapas de los orificios creados en el pavimento y en la forma de la esfera.

Con el propósito de poder analizar y comparar los diferentes modelos en las mismas condiciones, se empleó una opción de COMSOL que permite definir uno o varios puntos de recepción en el sistema. En el presente trabajo se ha optado por tomar varios puntos situados cada uno a medio metro del anterior, llegando hasta una distancia total de 6 metros, lo que permitirá evaluar de forma numérica el efecto de cada uno de los diseños, compararlos entre ellos y analizar tanto la progresión conforme se aleja de la fuente como la mejora o empeoramiento de la amplificación del sonido con respecto al diseño de referencia, es decir, el diseño ideal en el que todo el pavimento refleja.

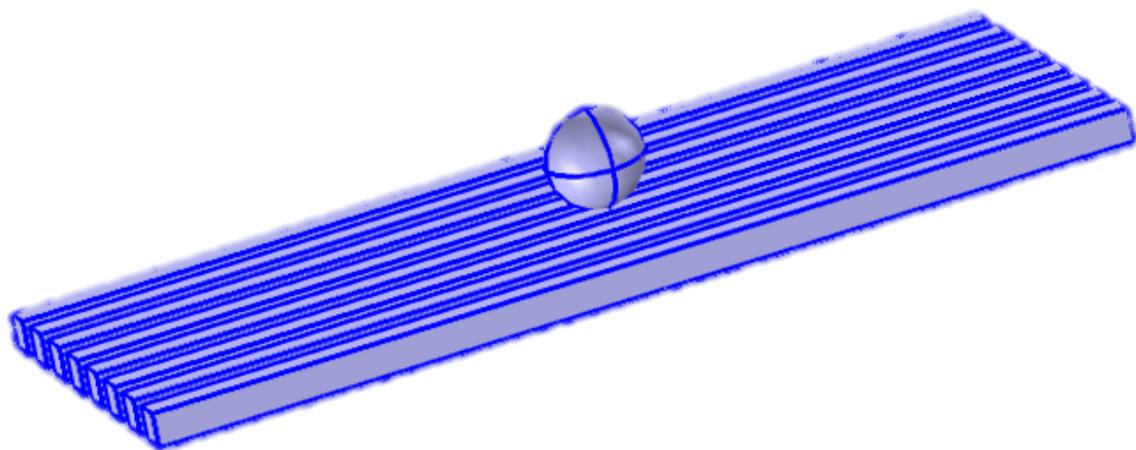


Figura 26: Selección de geometrías de elementos finitos

En esta figura se pueden ver elementos sombreados con una tonalidad azul, estos hacen referencia a los elementos calculados como elementos finitos (FEM), para ellos se aplicará una malla que completará casi todo su volumen.

En este caso, las geometrías analizadas como elementos finitos son la esfera en la que se contiene la fuente sonora y las aberturas rectangulares contenidas en el pavimento.

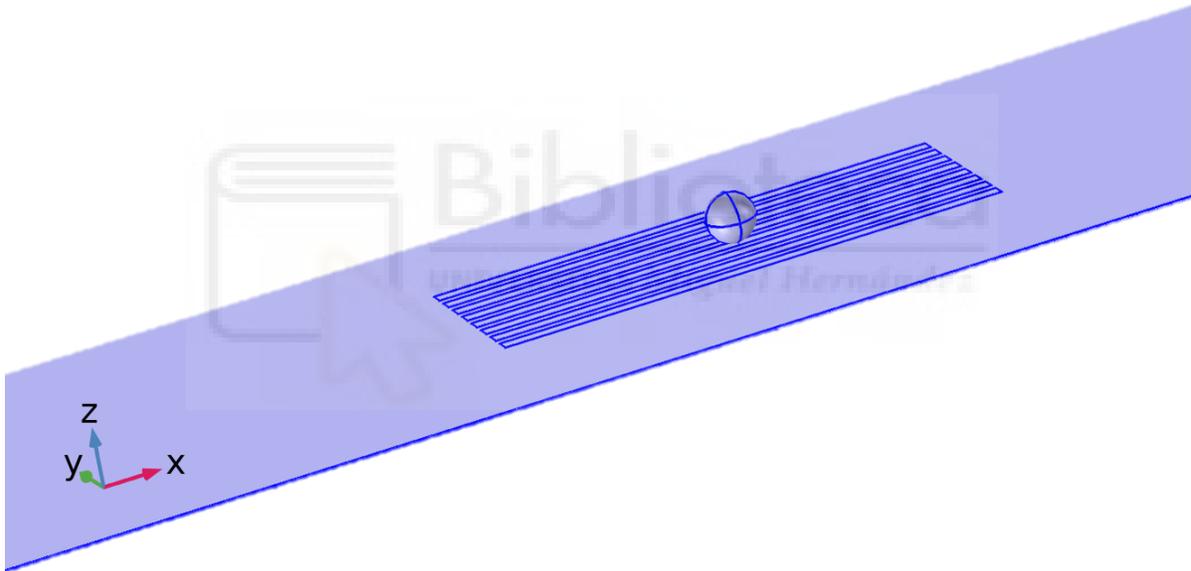


Figura 27: Selección de geometrías de elementos de contorno

En esta figura, al igual que en la anterior aparecen sombreados de azul ciertas geometrías, aunque en este caso corresponden a las calculadas por medio de elementos de contorno (BEM). Los elementos calculados como BEM en esta figura corresponden al pavimento reflectante, a las tapas de las aberturas, las cuales hacen de frontera entre el espacio interior FEM y el exterior BEM y la carcasa de la esfera, que también hace de frontera entre el interior de la esfera FEM y el espacio exterior BEM.

6.2.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN CADA MODELO

- Modelo 1 (Diseño de referencia):

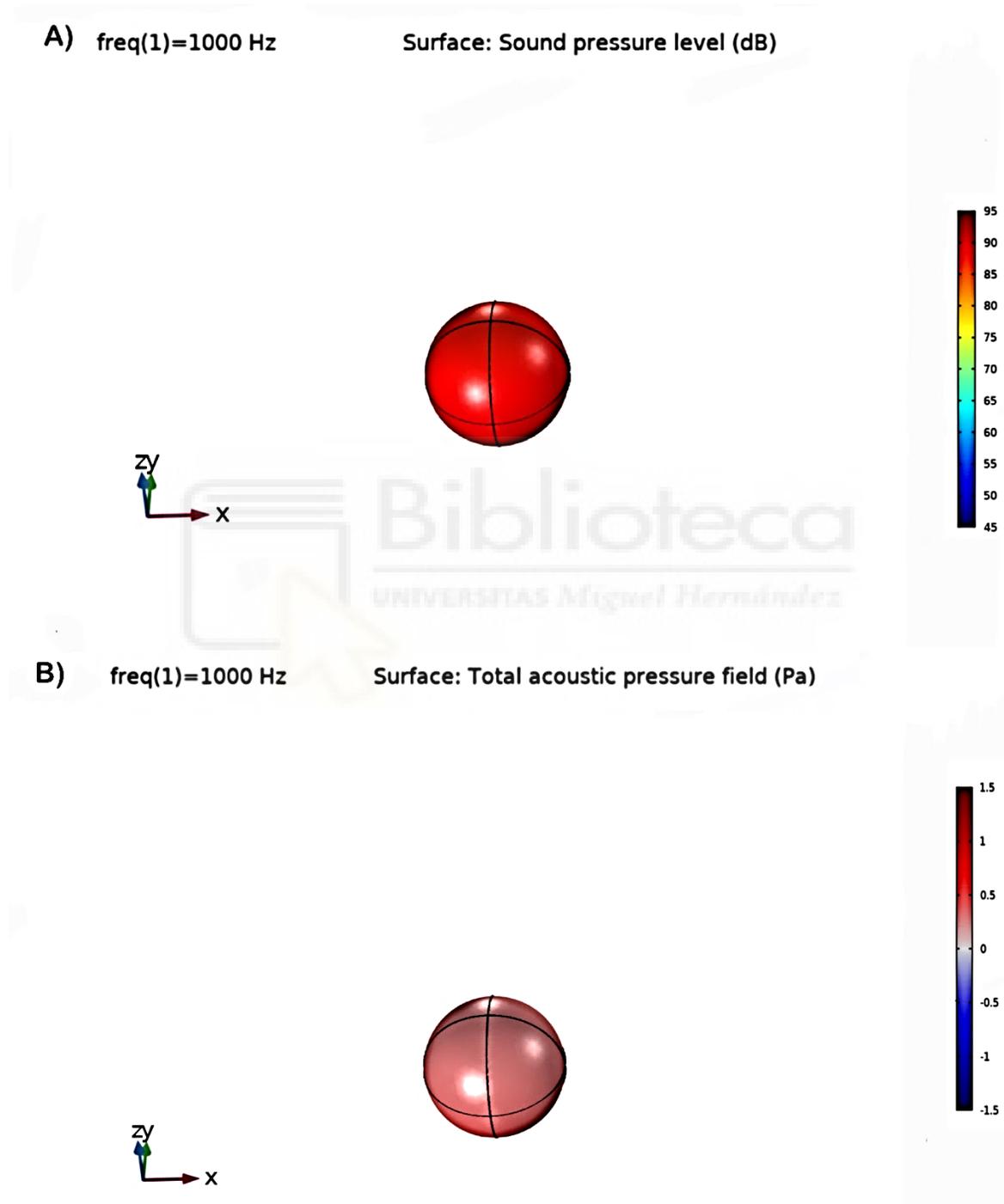


Figura 28: Presión sonora de elementos finitos en decibelios (A) y Pascales (B)

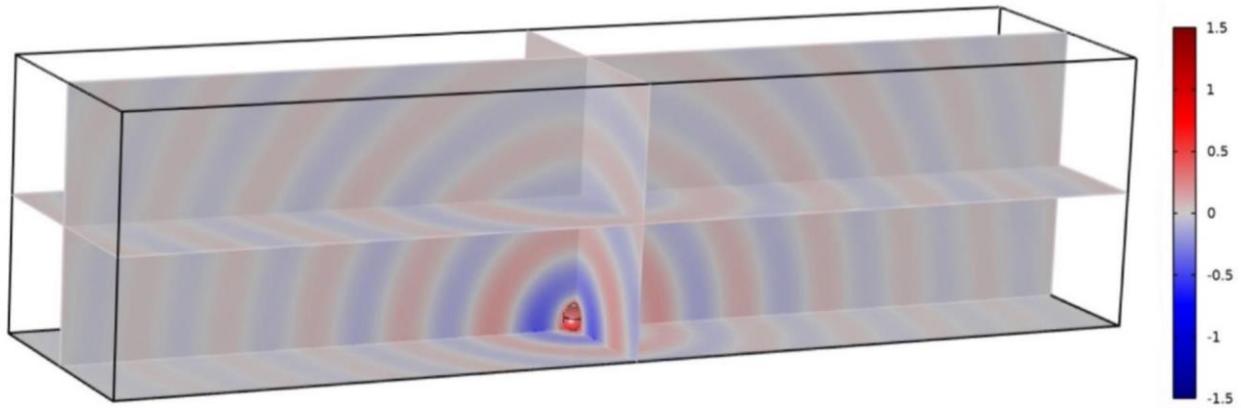
En la figura 28.A se representa la presión sonora de los elementos finitos, en este modelo el número de geometrías calculadas como elementos finitos es muy reducido ya que solo existe la esfera (Elemento FEM) y el pavimento totalmente reflectante calculado como elemento BEM.

Se puede apreciar que la esfera presenta una tonalidad de color rojo oscuro, que en la leyenda de la derecha se puede asociar con un nivel de presión expresado en pascales bastante elevado, eso es debido a que el aire contenido en la esfera está directamente en contacto con la fuente sonora.

En la figura 28.B se puede ver de forma gráfica la presión sonora expresada en decibelios de los diferentes elementos calculados como elementos finitos (FEM) como en el caso de la anterior figura, se puede observar que el único cuerpo que cuenta con color es la esfera, ya que es el único cuerpo calculado como FEM, además, se puede ver que en la parte inferior de la esfera el color es un rojo intenso, asociado con un nivel de presión sonora elevada, sin embargo la parte superior de la esfera cuenta con una tonalidad azul oscura, que al contrario de la parte inferior se asocia con un nivel de presión acústica muy baja, esto es debido a la direccionalidad de la fuente sonora.

A) freq(1)=1000 Hz

Multislice: Total acoustic pressure field (Pa)
Surface: Total acoustic pressure field (Pa)



B) freq(1)=1000 Hz

Surface: Total acoustic pressure field (Pa)

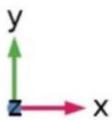
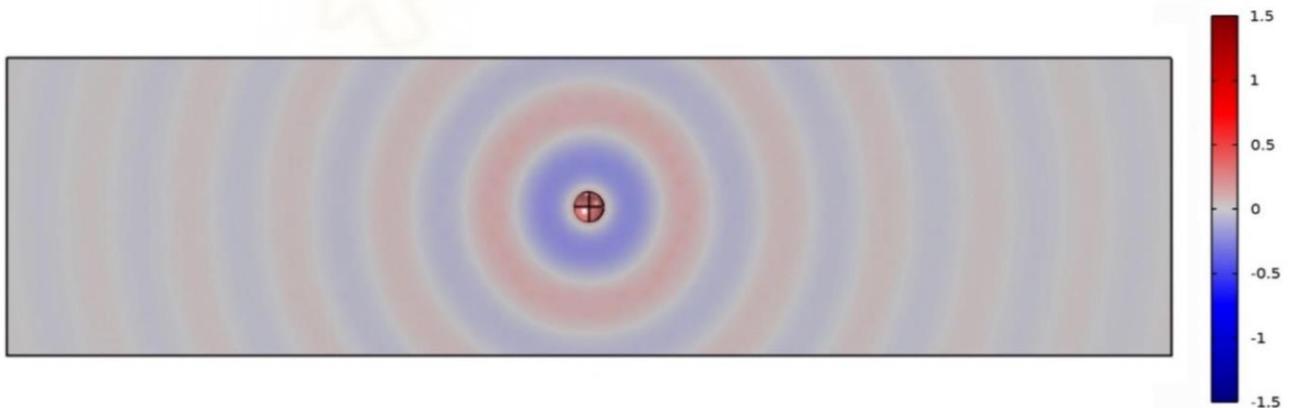


Figura 29: Campo de presión acústica en pascuales multiplano (A) y en elementos BEM (B) para modelo de referencia.

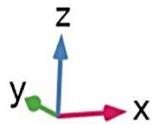
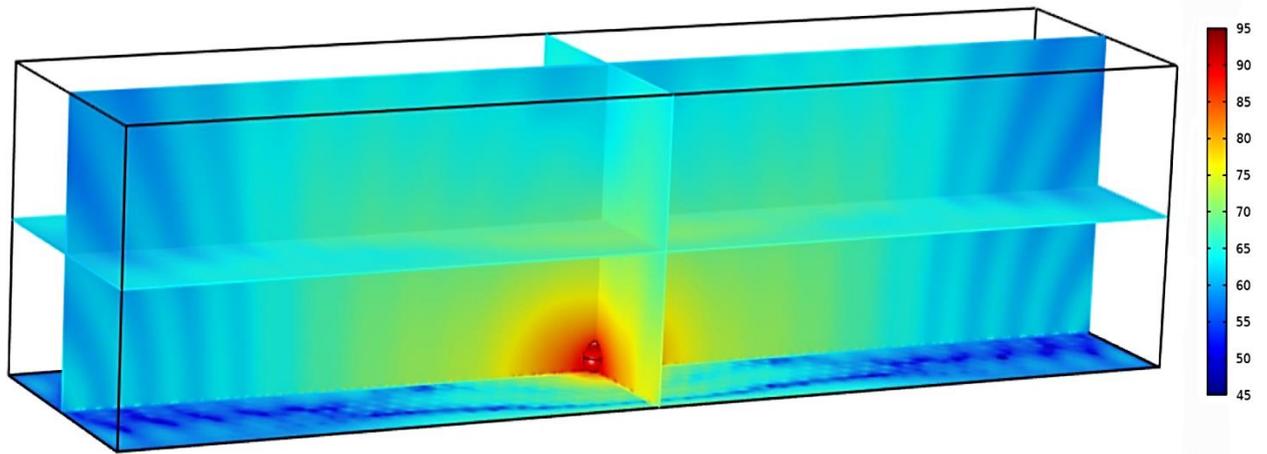
En figura 29.A se muestra la presión sonora de los elementos de contorno, esta presión se muestra como anillos rojos, azules y blancos, estos se separan con una distancia igual a la longitud de onda. En la leyenda se pueden ver las tonalidades de colores empleadas y el orden de magnitud de los valores que contiene el resultado de la simulación.

Como se puede ver la esfera está resaltada en un color rojo intenso mientras que en el pavimento vemos formas de diversos colores, esto es debido a que la presión más fuerte o inicial se encuentra contenida en la esfera, en la que su carcasa se considera como elemento BEM mientras que por el pavimento se propaga haciéndose cada vez menos fuerte.

Mientras tanto, en la figura 29.B se puede observar la presión sonora expresada en pascales para el primer modelo, es decir, el de referencia, es idéntica a la anterior, pero en esta se puede ver la propagación de las ondas del sonido en varios planos, lo que permite un análisis tridimensional gracias a tener varios planos que se interseccionan.

Como en la anterior figura, la leyenda está comprendida entre -1,5 y 1,5 Pa, además estos valores se asocian con colores que van desde azul oscuro hasta rojo oscuro.

A) freq(1)=1000 Hz Multislice: Sound pressure level (dB) Surface: Sound pressure level (dB)



B) freq(1)=1000 Hz Multislice: Sound pressure level (dB) Surface: Sound pressure level (dB)

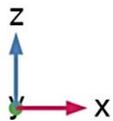
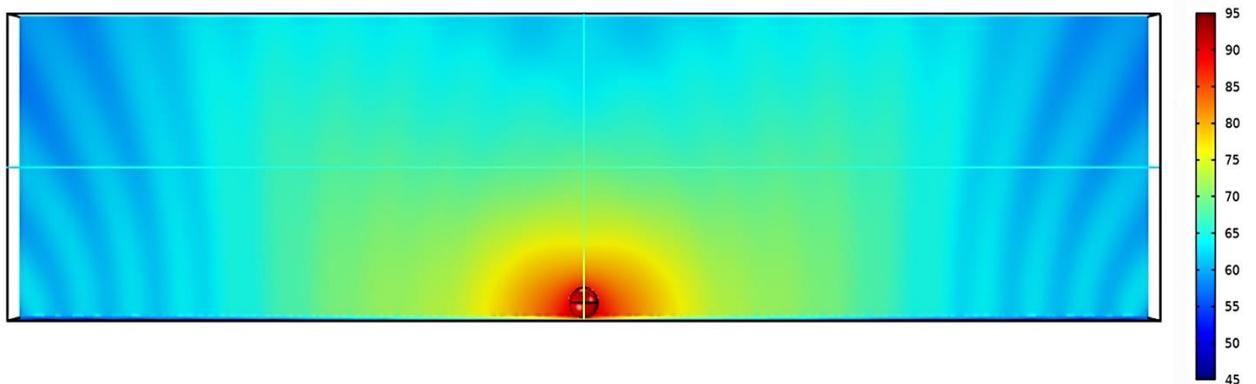


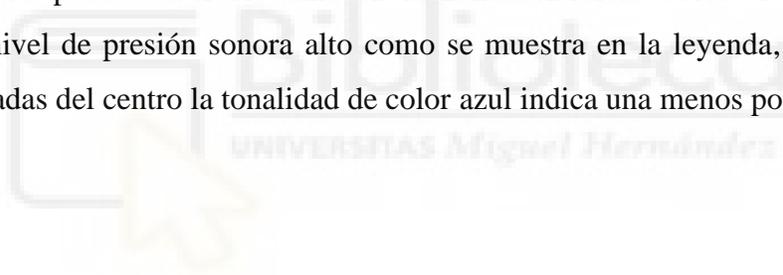
Figura 30: Nivel de presión sonora medido en decibelios en plano tridimensional (A) y vista lateral (B).

En la figura 30.A se muestra la presión sonora del sistema expresada en decibelios, al igual que en la figura anterior, se representa un plano tridimensional que deja ver el cambio o la progresión de la presión sonora.

En la parte central se encuentra la esfera con la fuente sonora monopolar, de ahí que sea la zona donde más nivel sonoro exista, además es fácilmente reconocible por el color que presenta y los niveles que podemos extraer de la leyenda. En este caso el nivel de decibelios existente se encuentra entre 45 a 95 dB.

Las medidas del plano de estudio vuelven a ser 4 m de largo, 1 m de alto y 1 m de ancho.

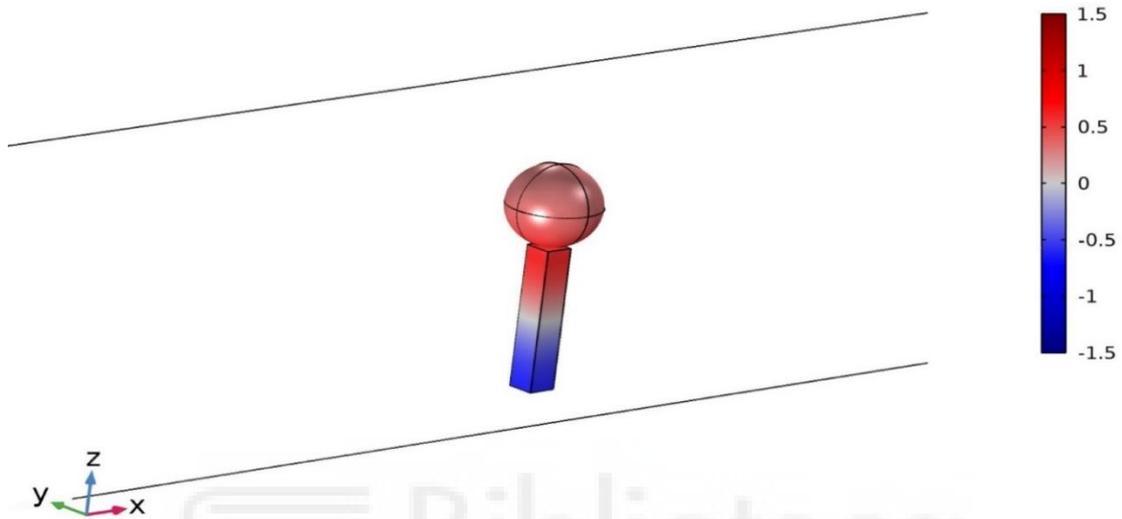
Si se observa la figura 30.B se puede analizar un detalle de la figura anterior, pero con una vista lateral que permite ver de una manera sencilla y clara la variación de la presión sonora en decibelios. Se puede observar como en la zona central se ubica el color rojo que simboliza un nivel de presión sonora alto como se muestra en la leyenda, y en las zonas externas o alejadas del centro la tonalidad de color azul indica una menos potencia sonora.



- **Modelo 2 (geometría cuadrada en pavimento):**

A)

freq(1)=1000 Hz Surface: Total acoustic pressure field (Pa)



B)

freq(1)=1000 Hz Surface: Sound pressure level (dB)

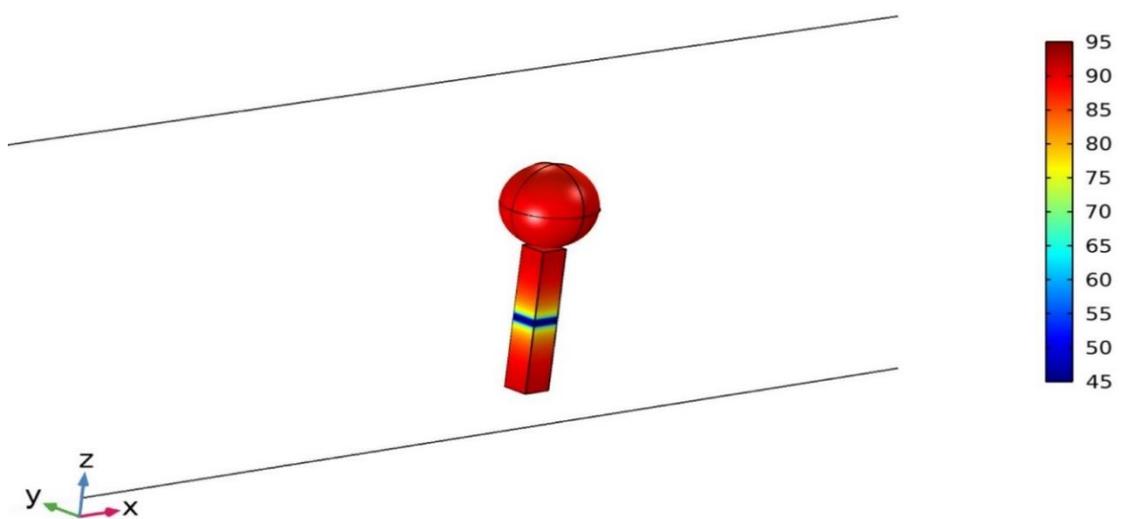


Figura 31: Presión acústica elementos FEM en pascales (A) y en decibelios (B).

En la figura 31.A correspondiente a la presión sonora de los elementos calculados como FEM o elementos finitos se puede apreciar que aparecen representados con colores tanto la esfera que contiene a la fuente sonora como la cavidad de forma cuadrada, esto simboliza la presión sonora expresada en pascales en el aire interior de ellos.

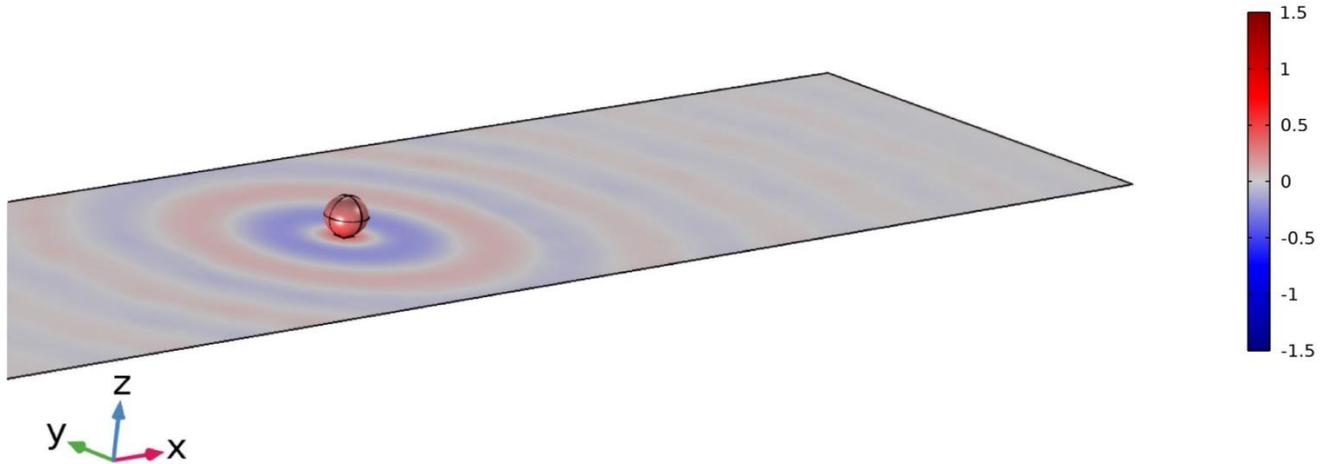
Se puede observar como la parte superior de la cavidad se representa con tonalidades rojas y la parte interior con tonalidades azules, esto significa que en el principio de la geometría el aire se ha conseguido excitar.

En la figura 31.B se puede analizar la presión sonora en los elementos FEM, aunque a diferencia con la anterior aparece expresada en decibelios. En este caso se puede observar que solo aparecen en color la esfera y la abertura en el pavimento.

Se puede apreciar que la esfera y parte de la abertura aparecen en rojo, lo cual según indica la leyenda hace referencia a una zona de máxima presión sonora, Además justo en el centro de la abertura se puede ver una zona azul, que significa que es una zona de baja presión sonora, esto se debe a la longitud de onda.

A)

freq(1)=1000 Hz Surface: Total acoustic pressure field (Pa)



B)

freq(1)=1000 Hz Multislice: Total acoustic pressure field (Pa)
Surface: Total acoustic pressure field (Pa)

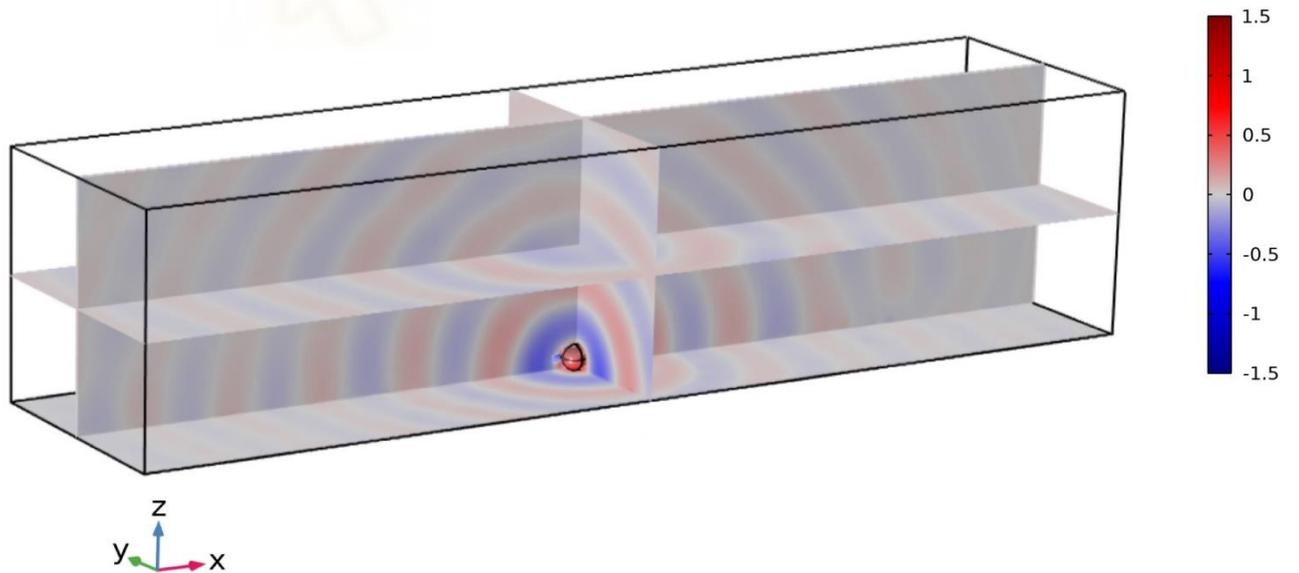


Figura 32: Campo de presión acústica en BEM medido en pascales (A) y multiplano (B) en Modelo de Referencia.

En la figura 32.A se representa la presión sonora correspondiente a los elementos de contorno o BEM, esta presión aparece expresada en pascales.

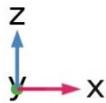
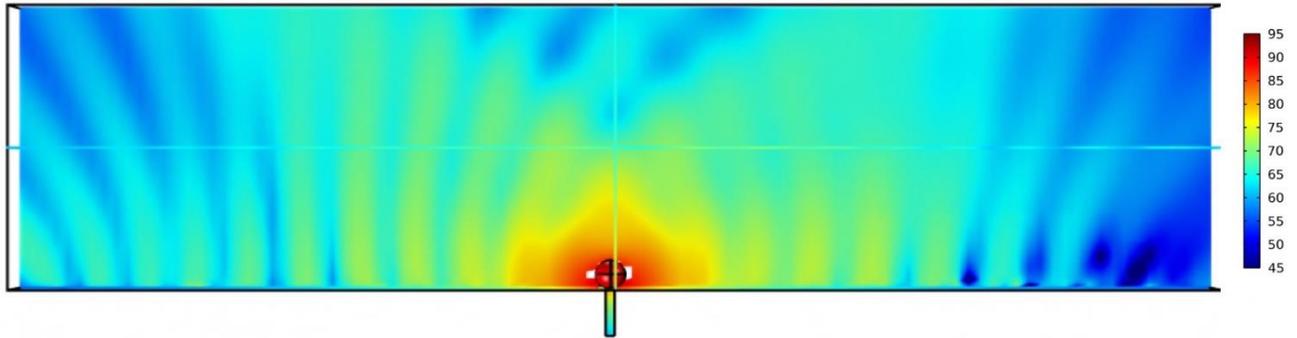
Para facilitar la representación gráfica se han empleado tonos de color azules, blanco y rojos, en la imagen se puede ver como aparecen anillos de estos colores, además la zona central presenta tonos más fuertes y conforme se aleja de la fuente sonora van volviéndose más pálidos, esto quiere decir que la propagación del sonido se va atenuando hasta desaparecer.

En la figura 32.B representa al igual que la anterior la presión sonora expresada en pascales de los elementos de contorno, aunque gracias a los planos que se intersecan que aparecen se puede ver de forma tridimensional la propagación de la presión sonora.

Las tonalidades de color empleadas son idénticas a las de la imagen anterior, además se puede ver como entre anillos rojos aparecen dos anillos blancos y uno azul, esto representa el punto máximo positivo de la onda, las dos veces que se hace nula la presión y el pico negativo hasta volver al pico positivo, es decir cada pico positivo está separado entre sí por una distancia igual a la longitud de onda.

A)

freq(1)=1000 Hz Multislice: Sound pressure level (dB)
Surface: Sound pressure level (dB)



B)

freq(1)=1000 Hz Multislice: Sound pressure level (dB)
Surface: Sound pressure level (dB)

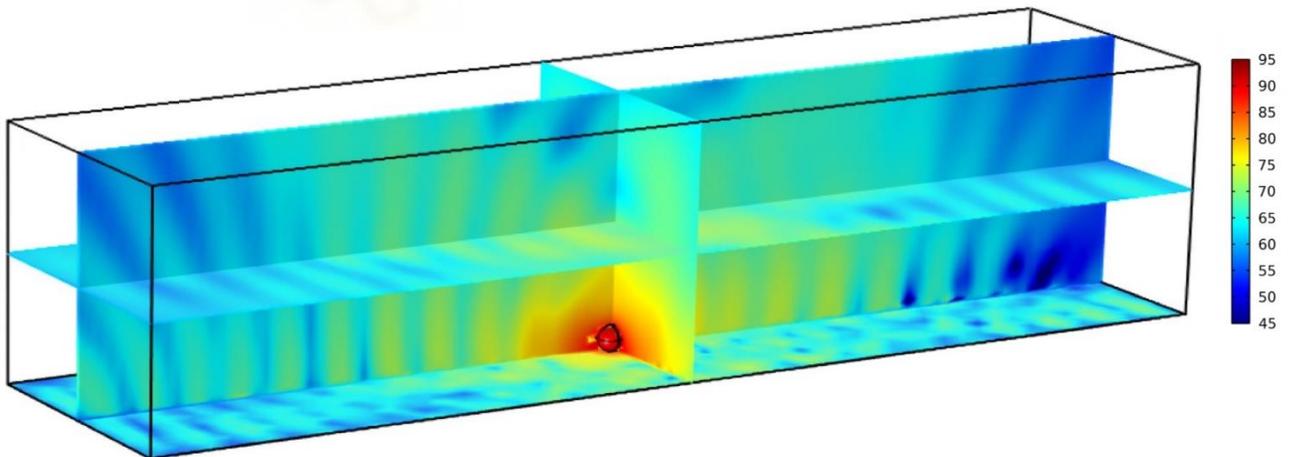


Figura 33: Nivel de presión sonora en decibelios (A) y multiplano (B).

En la figura 33.A se puede ver la presión sonora expresada en decibelios en todo el plano de estudio. En este caso la lectura e interpretación de esta imagen se ve muy enriquecida gracias a los planos que se intersectan, los cuales ofrecen una imagen tridimensional de cómo se propaga esta presión sonora.

Se puede ver que los máximos valores se alcanzan en la zona central donde se encuentra la esfera de la fuente sonora, y a medida que se aleja de esta zona van apareciendo otras tonalidades de color que expresan valores menores, en este resultado los valores se encuentran comprendidos entre 45 y 95 db, además se puede apreciar la separación de las ondas.

En la figura 33.B representa lo mismo que la anterior, pero se ha realizado una vista lateral para poder apreciar con detalle la variación de la presión sonora.



- **Modelo 3 (Geometría Rectangular):**

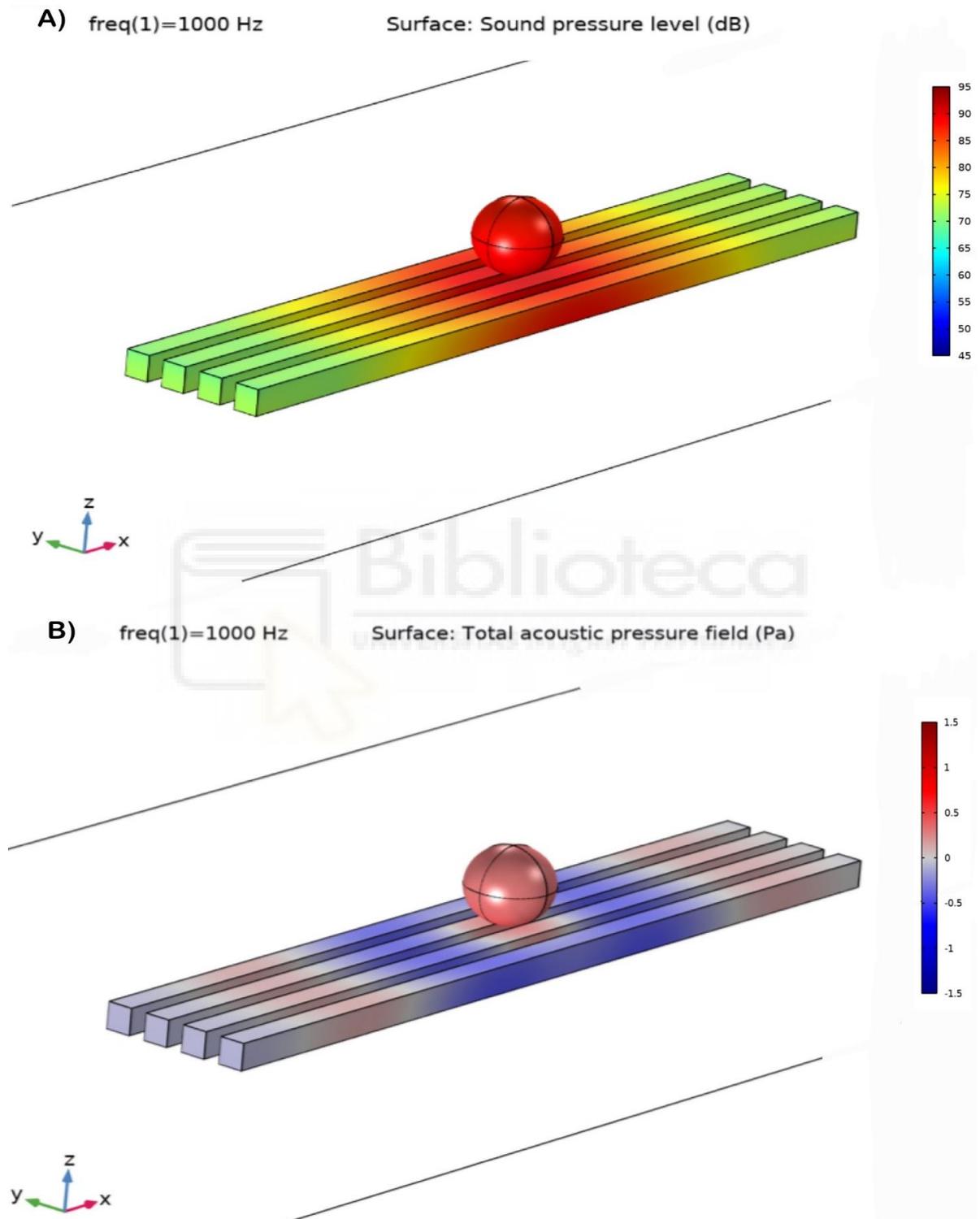


Figura 34: Nivel de presión sonora en elementos finitos calculados en decibelios (A) y en pascales (B) en Modelo Rectangular.

En la figura 34.A se puede analizar de forma gráfica la variación de presión sonora expresada en pascuales en las diferentes geometrías calculadas como elementos finitos o FEM, para poder visualizar la presión con sus valores se emplean diferentes tonalidades de color rojo, azul y blanco, a su vez cada una de estas tonalidades se encuentra ligada o relacionada con un valor numérico comprendido entre los valores máximos encontrados en el modelo, los cuales van entre 4 y -4 Pa.

En la figura 34.B se puede analizar de forma gráfica la variación de presión sonora expresada en decibelios en las diferentes geometrías calculadas como elementos finitos o FEM, para poder visualizar la presión con sus valores se emplean diferentes tonalidades de, a su vez cada una de estas tonalidades se encuentra ligada o relacionada con un valor numérico comprendido entre los valores máximos encontrados en el modelo.



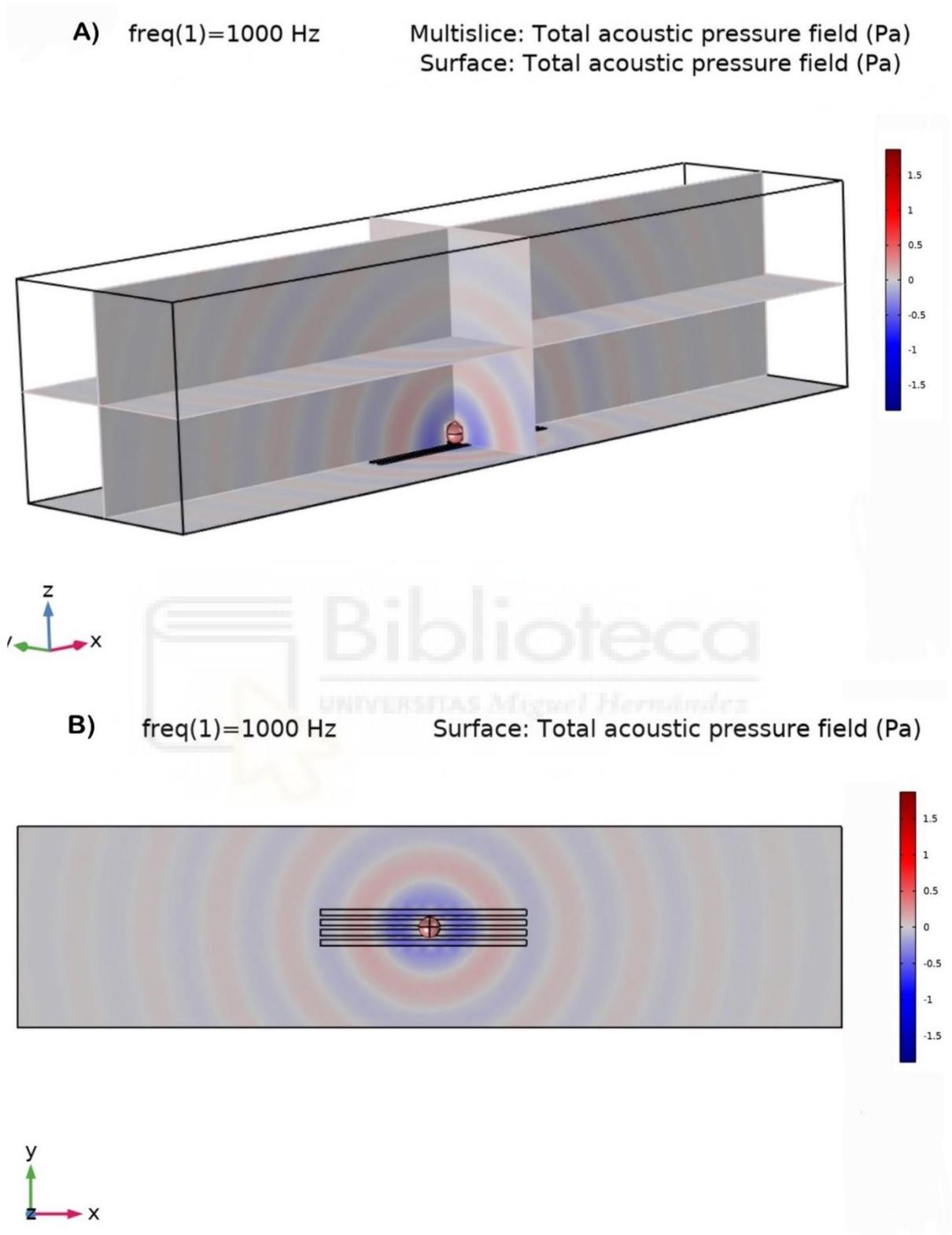


Figura 35: Campo de presiones sonoras en pascuales total (A) y de elementos BEM (B) de Modelo Rectangular.

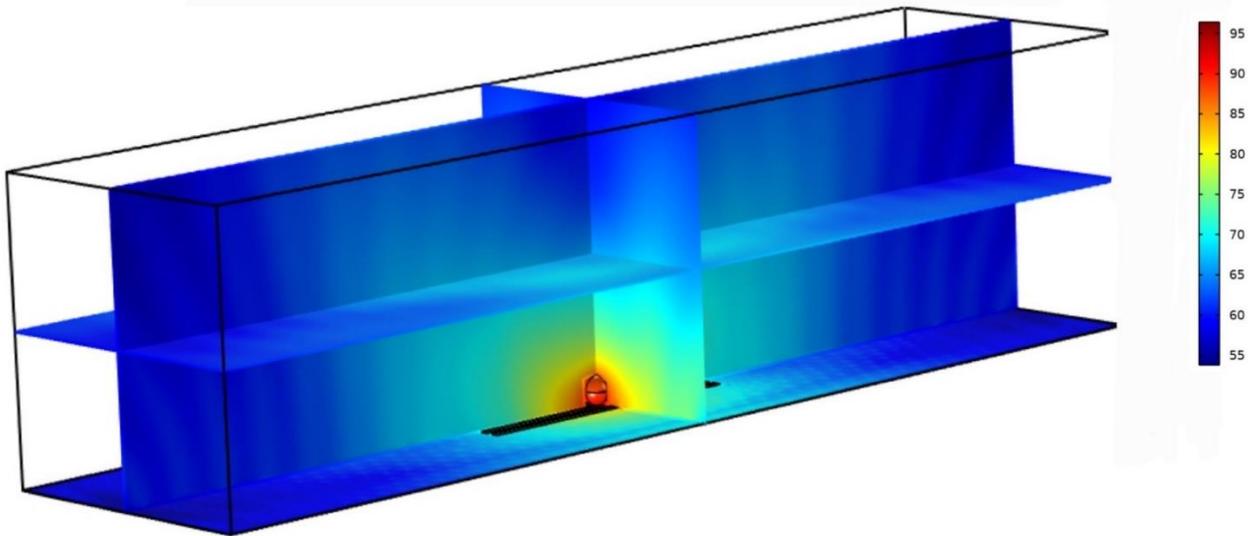
En la figura 35.A se puede observar la presión sonora expresada en pascales de las superficies calculadas como elementos de contorno o BEM, para facilitar la lectura y representar los valores y las distancias entre ondas, aparecen diferentes anillos de colores azules, blancos y rojos, pero con diferentes tonalidades.

Para entender bien la representación es importante detallar que, entre dos anillos rojos, los cuales expresan pico máximo positivo, existen dos anillos blancos (valor nulo) y un anillo azul (pico mínimo).

En la figura 35.B se expresa lo mismo que en la A, pero dotándola de dos planos que se intersecan, gracias a estos se consigue una representación tridimensional de la variación de la presión sonora en todo el espacio de estudio, lo que ayuda a visualizar como el sonido se propaga no solo horizontalmente si no en todas direcciones.



A) freq(1)=1000 Hz Multislice: Sound pressure level (dB) Surface: Sound pressure level (dB)



B) freq(1)=1000 Hz Multislice: Sound pressure level (dB) Surface: Sound pressure level (dB)

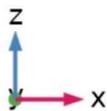
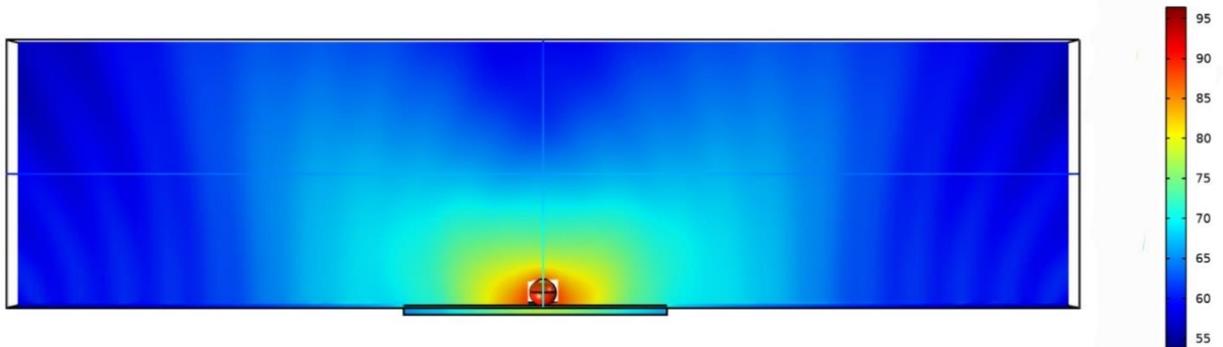


Figura 36: Nivel de presión sonora en decibelios vista multiplano (A) y vista lateral (B) de Modelo Rectangular.

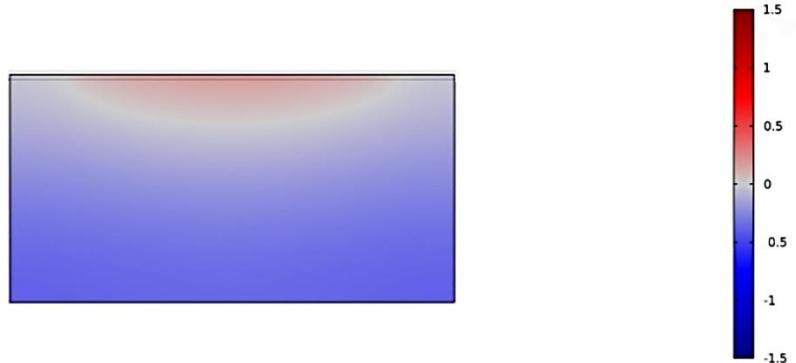
En la figura 36.A se representa la presión sonora total expresada en unidad de decibelios. Se puede apreciar como en la zona central donde se ubica la fuente sonora se encuentran los mayores valores simbolizados con tonalidades rojas y naranjas, esto es debido a que la fuente sonora es el emisor acústico, por otro lado, cuanto más se aleja de la fuente las tonalidades cambian a azul, lo que representa los menores valores de presión sonora.

En la figura 36.B se representa lo mismo que la anterior, pero se ha escogido una vista lateral para poder apreciar con detalle la variación de presión acústica en decibelios.



- **Modelo 4 (modelo ranura corta):**

A) freq(1)=1000 Hz Surface: Total acoustic pressure (Pa)



B) freq(1)=1000 Hz Surface: Total sound pressure level (dB)

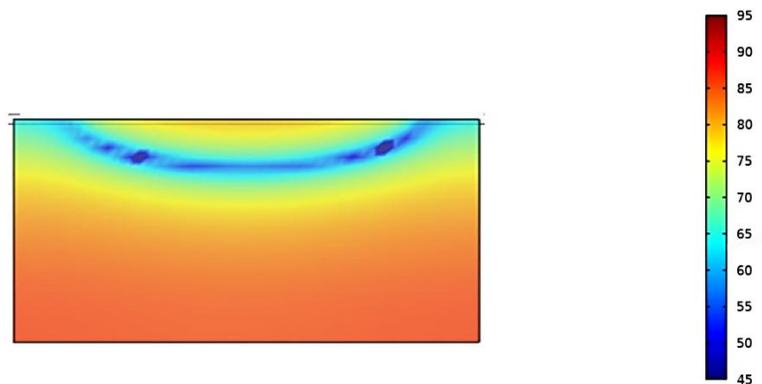


Figura 37: Presión sonora en pascuales visto en FEM (A) y en decibelios (B) en Modelo Ranura Corta.

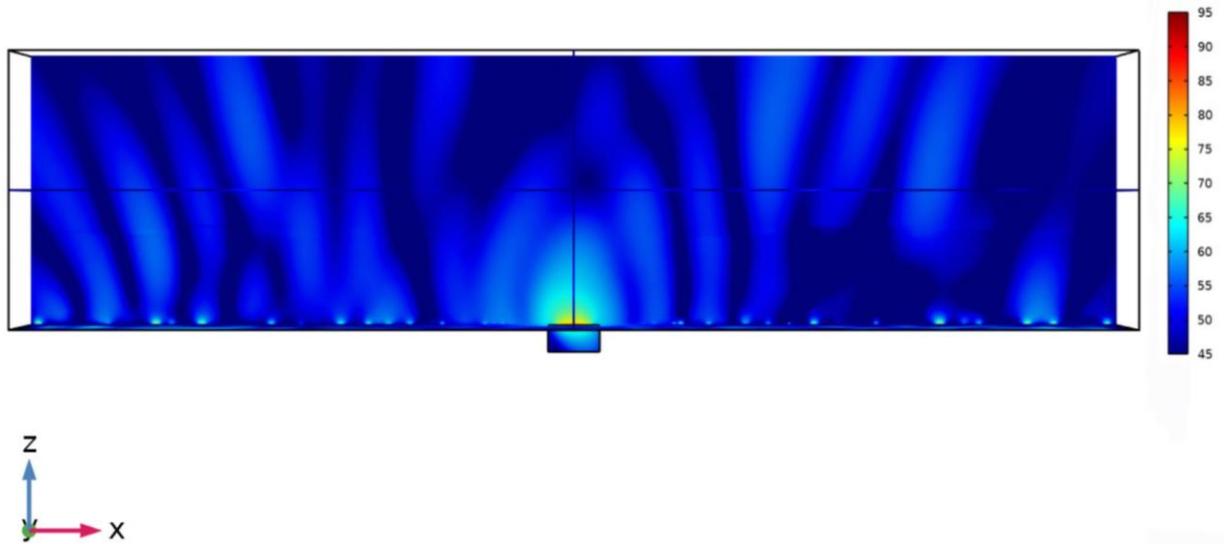
En la figura 37 se puede apreciar la presión sonora en el interior de los elementos calculados por elementos finitos, que en este caso hace referencia únicamente al hueco que hay en el pavimento la figura 37.A aparece expresado en Pa y en la 37.B expresada en dB.

En la leyenda se relacionan los diferentes tonos de color que aparecen en la figura con los diferentes valores que aparecen en esta. Al igual que en los anteriores modelos se ha conservado un rango en pascales desde -1,5 Pa a 1,5 y de 45 – 95 en dB.

Para desarrollar este modelo no se ha implementado una fuente sonora, sino que se le ha dotado a la tapa de una vibración o aceleración normal que permite o causa que el aire próximo a ella se excite y entre en resonancia.



A) freq(1)=1000 Hz Multislice: Sound pressure level (dB) Surface: Sound pressure level (dB)



B) freq(1)=1000 Hz Multislice: Total acoustic pressure field (Pa)
Surface: Total acoustic pressure field (Pa)

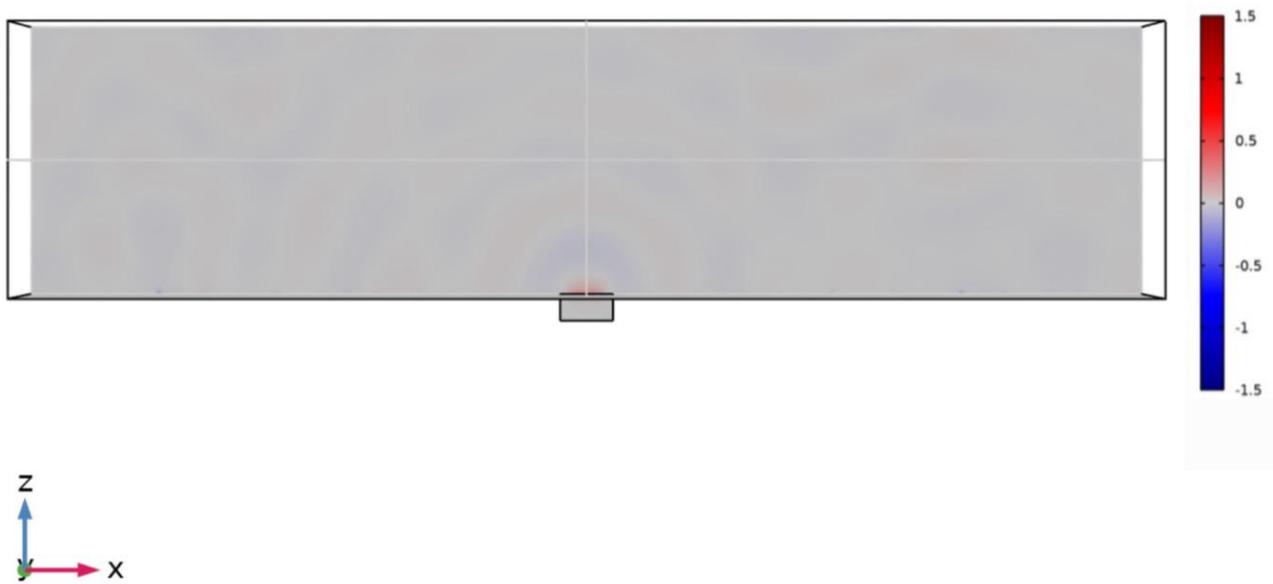


Figura 38: Presión sonora multiplano en decibelios de Modelo Ranura Corta (A) y en pascales (B).

En la figura 38.A se presentan dos planos aparentemente similares pero que expresan dos características diferentes, en la figura 38.A se representa la presión sonora en decibelios en los elementos BEM, para simplificar la interpretación y permitir una comparación justa y correcta se ha establecido un margen de 45 a 95 dB.

En el caso de la figura 38.B se representa la presión sonora en Pa en todos los elementos BEM con unidad de pascuales, además se proporcionan diversos planos para poder tener una imagen tridimensional de lo que sucede en ella.



6.2.3 RESULTADOS COMPARADOS DE CADA MODELO

Como se ha mencionado anteriormente, se ha realizado una medida cada 0,5 m desde el punto central de la fuente sonora, llegando hasta una distancia de 6 m, que simula ser la distancia máxima a la que se encontrará el receptor en la realidad, estas medidas por puntos nos permiten obtener una idea progresiva de la potencia sonora en decibelios que llega conforme se avanza la distancia.

A continuación, se muestran los valores obtenidos en cada uno de los modelos:

Tabla 2: Progresión cada medio metro de la presión acústica en los modelos iniciales.

Modelos/Distancia	0,5 m	1 m	1,5 m	2 m	2,5 m	3 m	3,5 m	4 m	4,5 m	5 m	5,5 m	6 m
Modelo 1	65,8	64,4	61,1	59,3	58,7	56,8	54,3	52,3	51,1	50,2	49,4	48,6
Modelo 2	68,1	64,2	60,1	60,5	58,1	54,4	51,3	50,1	49,5	48,7	47,9	47,0
Modelo 3	67,2	65,1	60,2	59,1	59,3	57,6	55,1	53,0	51,4	50,1	49,0	48,0
Modelo 4	39,1	39,9	40,2	41,0	50,1	47,6	39,7	44,5	42,9	42,4	44,2	42,5

A continuación, se muestra un gráfico en el que se comparan los 4 modelos ya mencionados, en él podemos ver tanto la tendencia de cada modelo como la diferencia que existe en cuanto a potencia sonora de cada uno de ellos.

Como se puede apreciar se han representado cada uno de ellos en diferentes colores, son fácilmente identificables gracias a la leyenda que aparece en la derecha, además como se puede ver, el eje horizontal muestra la distancia desde la fuente sonora avanzando medio metro en cada punto, y la vertical la presión sonora en decibelios.

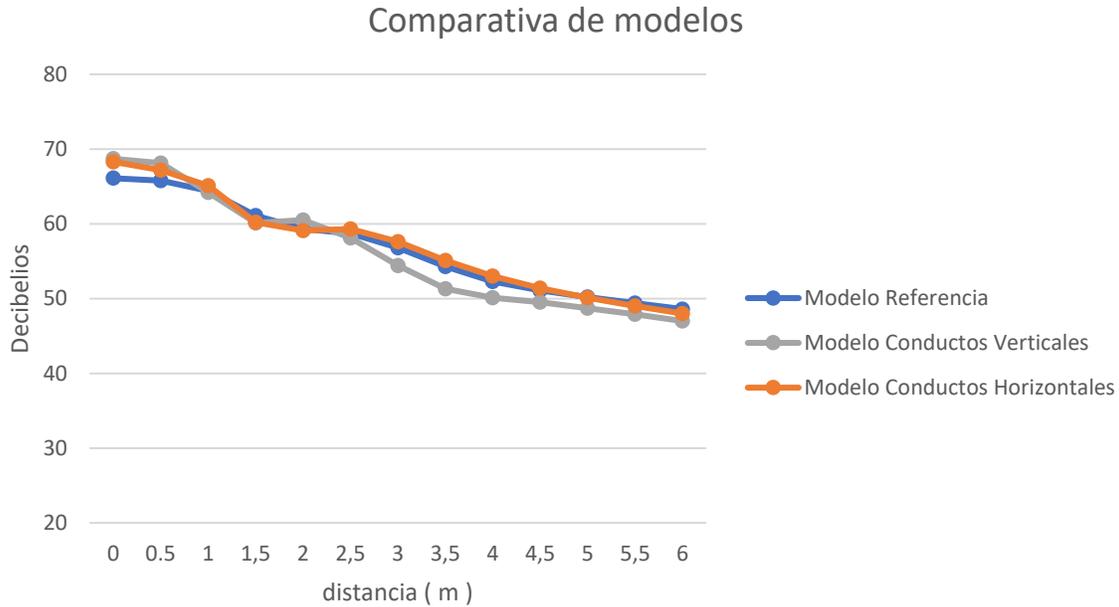


Figura 39: Gráfico comparativo de las lecturas de cada modelo.

6.2.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como se puede observar en la gráfica anterior, los primeros 3 modelos siguen una progresión muy similar, hay que destacar que estos diseños son los que han empleado como medio para la excitación del aire una fuente de presión sonora monopolar con una potencia de 0,0002 mW por el contrario, el modelo de Ranura Corta ha utilizado una especie de tapa o superficie a la que se le ha asignado una aceleración normal de 10 m/s^2 que simula ser la vibración producida por el paso de la rueda de un vehículo sobre la metasuperficie, debido a esto sufren una progresión diferente, que, aunque resulta ser igualmente decreciente cuenta con un mayor número de irregularidades o picos.

6.3 PROPUESTA DE DISEÑO FINAL

El proceso seguido para el desarrollo del modelo final ha sido configurar un modelo base o de referencia para poder comparar los modelos de tapa vibratoria (Modelo Ranura Corta y Ranura Larga). Se puede observar en el siguiente esquema:

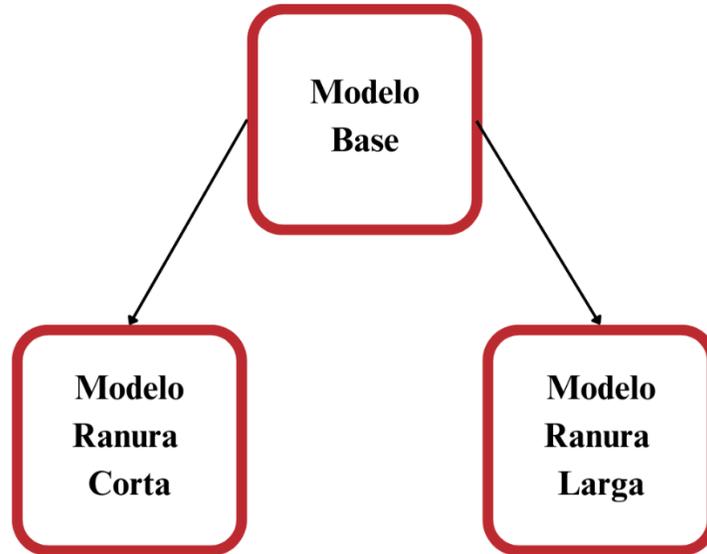


Figura 40 : Esquema modelos con tapa vibratoria.

Para el modelo final se ha empleado un diseño similar a una metasuperficie real, las dimensiones escogidas han sido 0,03 m de ancho, 2 m de longitud total, una tapa

central de 0,2 m de largo y 0,03 m de ancho, la tapa mencionada se ubica en el centro de la geometría, dejando una abertura a cada extremo de 0,9 m.

El funcionamiento del modelo descrito consiste en emplear la tapa de 0,2 m de largo e inducirle una aceleración normal semejante a la que provocaría un vehículo al rodar sobre la superficie. La longitud de 0,2 m viene dada por la longitud que apoya del neumático en el pavimento.

Para poder comprobar los resultados de este modelo se han creado dos opciones, la primera consiste en modelar únicamente la tapa en el pavimento liso sin ningún tipo de abertura ni extrusión, gracias a este modelo simple se podrá obtener una especie de guía para poder analizar los resultados del modelo de Ranura Larga y Ranura Corta mediante una estrategia

de comparación cualitativa. La segunda opción de este modelo final es diseñar toda la estructura descrita anteriormente con sus aberturas, extrusiones y medidas correspondientes. A continuación, se muestra la representación de ambos modelos empleando el software Comsol e Inventor, en este último se pueden apreciar las cotas de cada uno de ellos con el fin de tener una idea más precisa acerca de cómo se constituye su geometría.

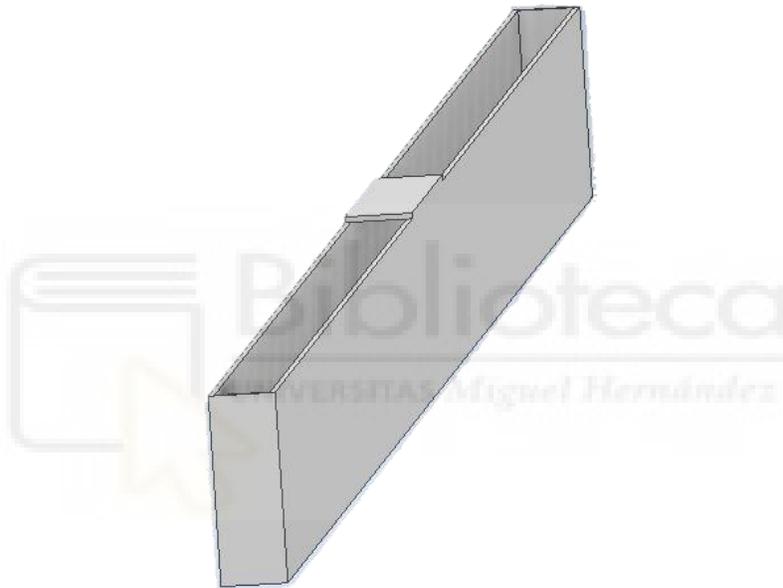


Figura 41: Representación del Modelo Ranura Larga en Autodesk Inventor.

En esta figura se puede ver una representación tridimensional del modelo final o modelo de Ranura Larga realizada con el software Autodesk Inventor, en ella se observan las dos aberturas de 0,9 m cada una con la tapa central metálica en la parte central entre ambas aberturas, esta tapa tiene una longitud de 0,2 m y una anchura de 0,03 m, esta es la que va a permitir la vibración con la que se excita el aire que tiene a su alrededor dando lugar a que se produzca un fenómeno de resonancia y que el sonido emitido sea expulsado por las aberturas.

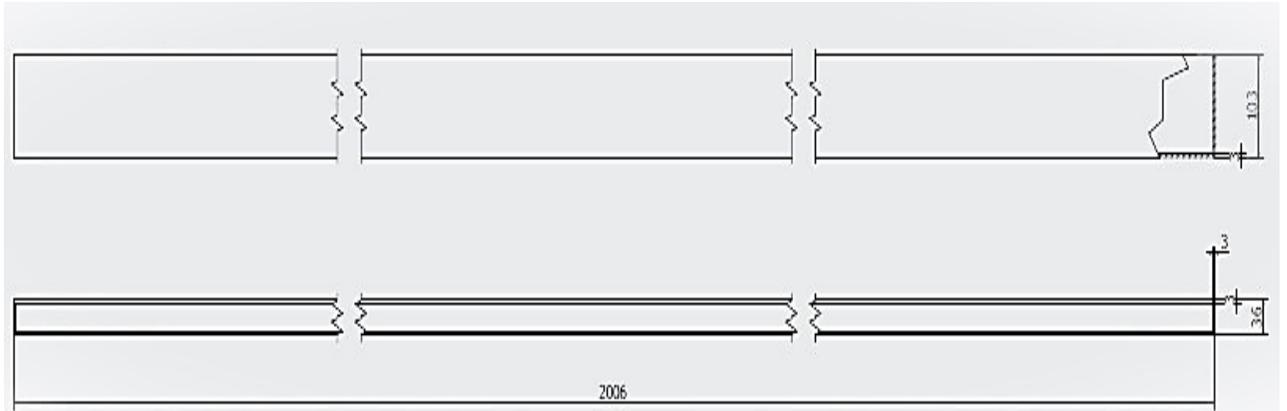


Figura 42: Plano de medidas del Modelo de Ranura Larga.

Esta figura muestra una representación 2D del modelo expuesto y además proporciona las medidas de este expresadas en milímetros.

Tabla 3: Progresión de presión acústica en decibelios de Modelo de Ranura Larga y Modelo Final Base.

Modelos/Distancia	0,5 m	1 m	1,5 m	2 m	2,5 m	3 m	3,5 m	4 m	4,5 m	5 m	5,5 m	6 m
Modelo Ref Tapa	25,6	29,0	31,9	33,1	31,9	29,0	25,6	22,3	19,3	16,6	14,2	12,1
Modelo R. Larga	44,2	40,0	24,9	44,5	43,5	45,8	40,2	41,9	41,8	44,4	45,7	43,8
Modelo R. Corta	39,1	39,9	40,2	41,0	50,1	47,6	39,7	44,5	42,9	42,4	44,2	42,5

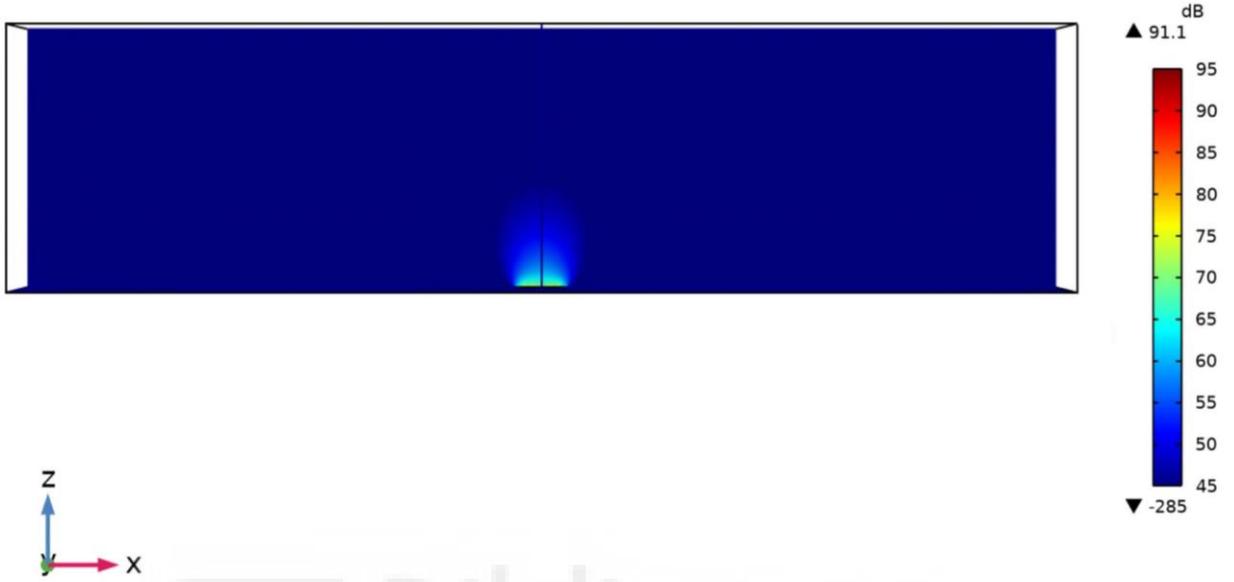
Mas adelante se muestran las gráficas con la progresión del Modelo Referencia con tapa, el Modelo de Ranura Larga y el anterior modelo de Ranura Corta, todos ellos calculados con el mismo método de excitación del aire, gracias a esta tabla se puede analizar la diferencia de potencia sonora entre ellos.

Como en los modelos anteriores, en los gráficos se tiene un eje horizontal que representa la distancia respecto a la fuente sonora y un eje vertical que indica la presión sonora en decibelios.

DISEÑO DE METASUPERFICIES DE RODADURA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA EMISIÓN SONORA DE RODADURA DE UN NEUMÁTICO

A) freq(1)=1000 Hz

Multislice: Total sound pressure level (dB)
Surface: Total sound pressure level (dB)



B) freq(1)=1000 Hz

Multislice: Total sound pressure level (dB)
Surface: Total sound pressure level (dB)

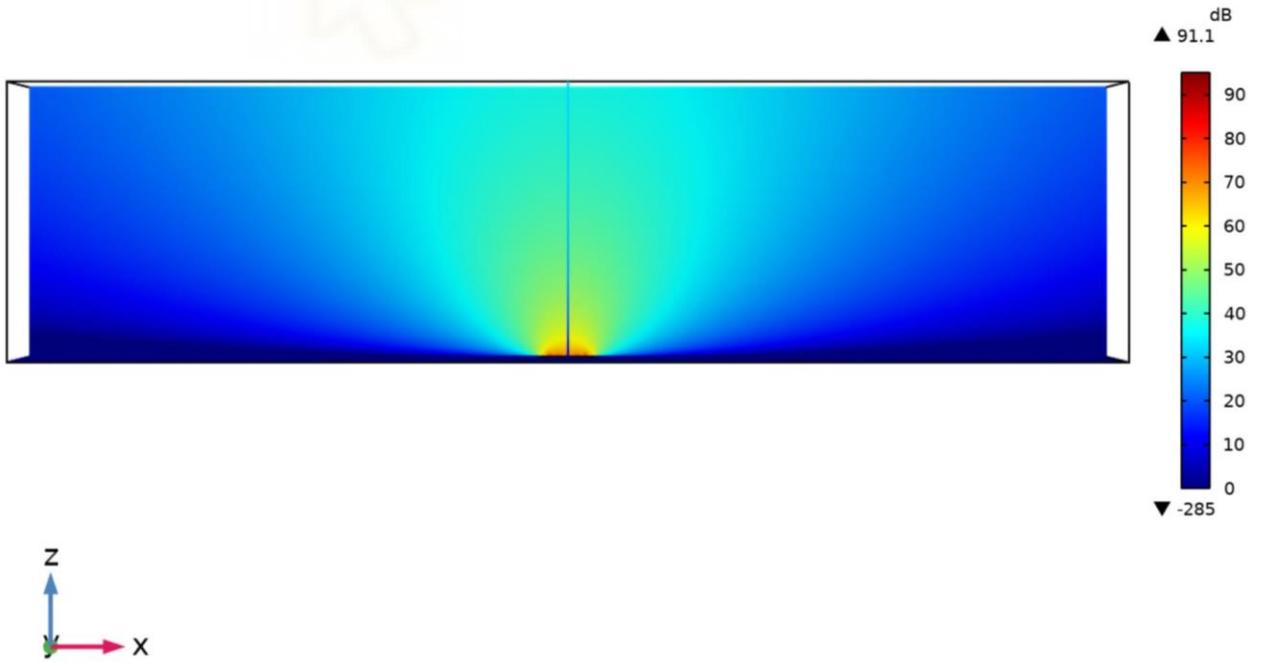


Figura 43: Nivel de presión en dB multiplano (A) y vista lateral (B) de Modelo Referencia Tapa.

En la figura 43.A se puede observar la presión sonora en decibelios del modelo Referencia Tapa, en ella se puede analizar la progresión de presión sonora en todo el campo de estudio, además es muy curioso ver como el reparto de presiones es totalmente simétrico debido a que no existe ninguna geometría que altere o deforme esta propagación. Es de añadir que el intervalo escogido para la leyenda ha sido el que se ha usado como referencia de comparación, es decir de 45 a 95 decibelios.

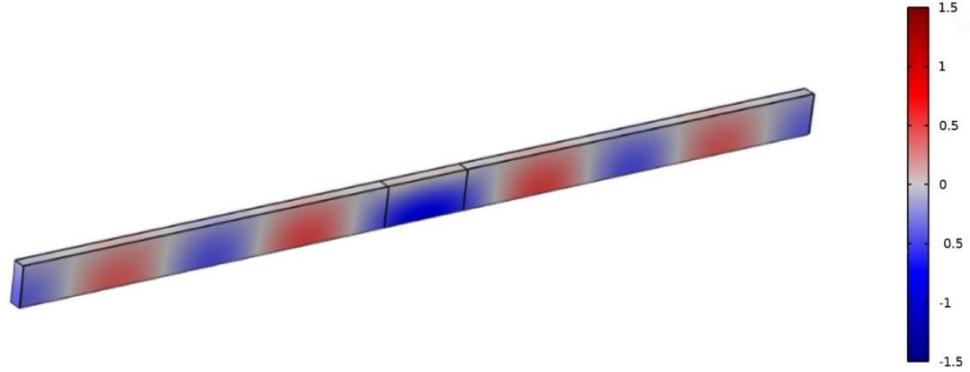
En la figura 43.B se aprecia un detalle lateral de la figura A donde se ve claramente el efecto simétrico de la propagación y las zonas de muy baja presión en los extremos de ella, se ha escogido como intervalo para la leyenda 0 a 90 decibelios con el fin de simplificar o hacer más visible el efecto explicado anteriormente, gracias a ello los colores son significativamente más vivos y fáciles de diferenciar.



DISEÑO DE METASUPERFICIES DE RODADURA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA EMISIÓN SONORA DE RODADURA DE UN NEUMÁTICO

A) freq(1)=1000 Hz

Surface: Total acoustic pressure (Pa)



B) freq(1)=1000 Hz

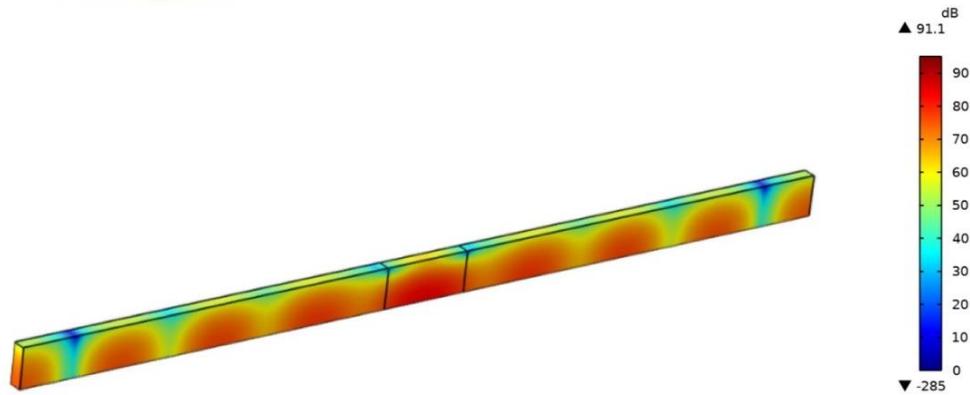


Figura 44: Presión sonora elementos BEM en Pascales (A) y Decibelios (B) de Modelo Ranura Larga.

En la figura 44.A se tienen dos subfiguras que en esencia representan lo mismo pero con una variación en las unidades en las que se dan los resultados, en la figura A se aprecia la presión sonora en pascales, además se puede apreciar los picos máximos de la amplitud representados en rojo, las zonas donde se hace nula en blanco y los picos mínimos representados en una tonalidad azul.

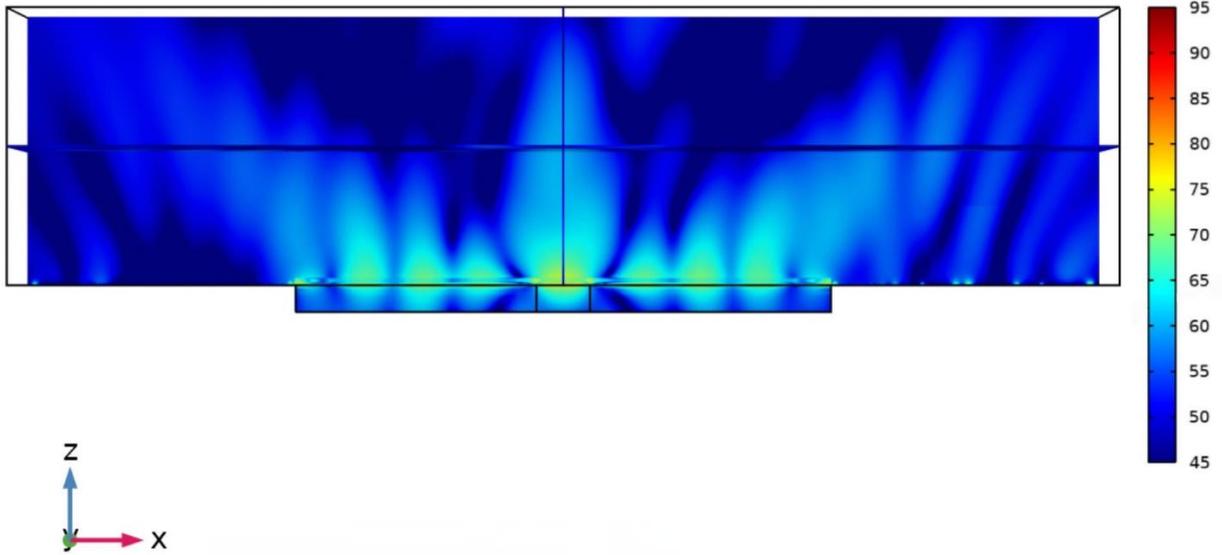
En la figura 44.B se analiza la presión sonora pero esta vez calculada en decibelios, en el caso de este último modelo se ha ampliado el rango de la leyenda con el fin de representar el mayor número de valores y cambios posibles, es por ello que se ha elegido un rango de 0 a 95 decibelios. Se puede identificar de forma sencilla las zonas excitadas, donde se ha alcanzado el efecto deseado.



DISEÑO DE METASUPERFICIES DE RODADURA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA EMISIÓN SONORA DE RODADURA DE UN NEUMÁTICO

A) freq(1)=1000 Hz

Multislice: Total sound pressure level (dB)
Surface: Total sound pressure level (dB)



B) freq(1)=1000 Hz

Multislice: Total sound pressure level (dB)
Surface: Total sound pressure level (dB)

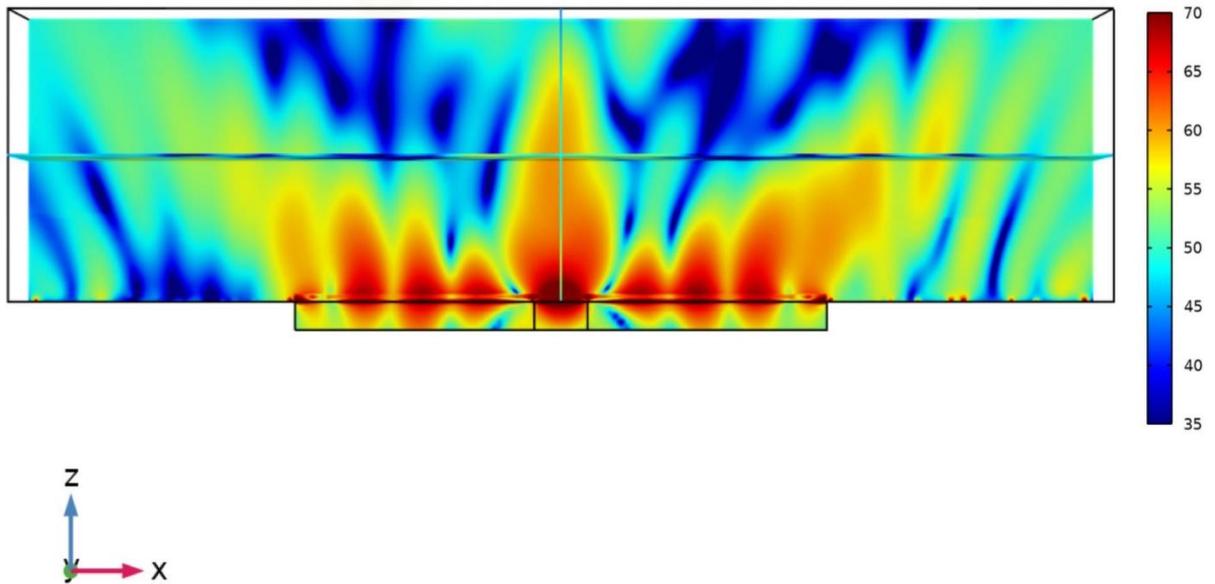


Figura 45: Nivel de presión sonora en decibelios mostrada en dos escalas diferentes con vista lateral de Modelo Ranura Larga.

En la figura 45 se muestran dos subfiguras que al igual que en la anterior representan lo mismo, pero en la figura 45.A se ha empleado el rango anteriormente citado que comprende desde 0 decibelios hasta 95 decibelios mientras que en la subfigura 44.B se ha acortado el rango con el fin de hacer más visible el efecto de propagación de la presión sonora.

En ambas es muy visual y fácilmente visible el efecto direccional de la presión acústica, la cual sale de las ranuras de 0,9 m citadas anteriormente y se propaga de forma longitudinal hacia ambos lados, este efecto es el que se ha expuesto en la tabla anterior.

En los gráficos que se muestran a continuación se tiene un eje horizontal que representa la distancia respecto a la fuente sonora y un eje vertical que indica la presión sonora en decibelios.

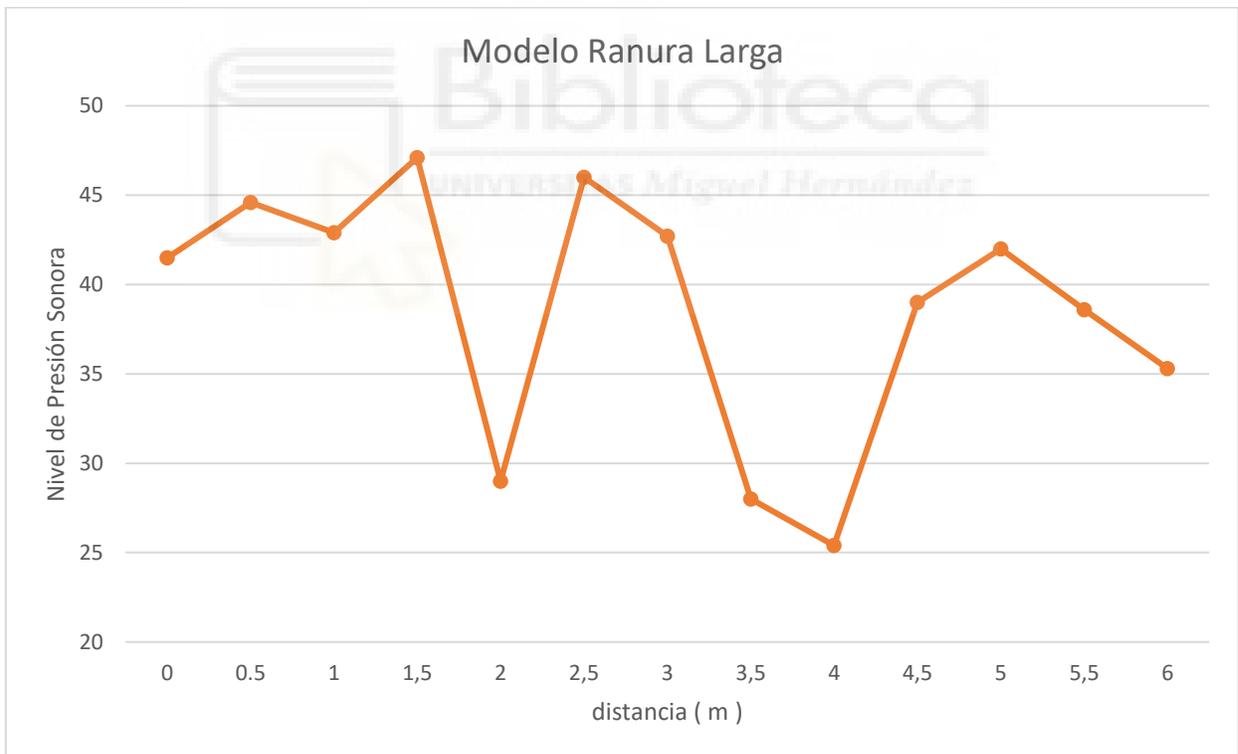


Figura 46: Gráfico de progresión de potencia sonora en Modelo de Ranura Larga.

Gracias a esta gráfica se puede apreciar como el efecto pico es parecido al del modelo 4, esto puede deberse en parte a que para la fuente sonora se ha empleado una vibración o aceleración normal de 10 m/s^2 .

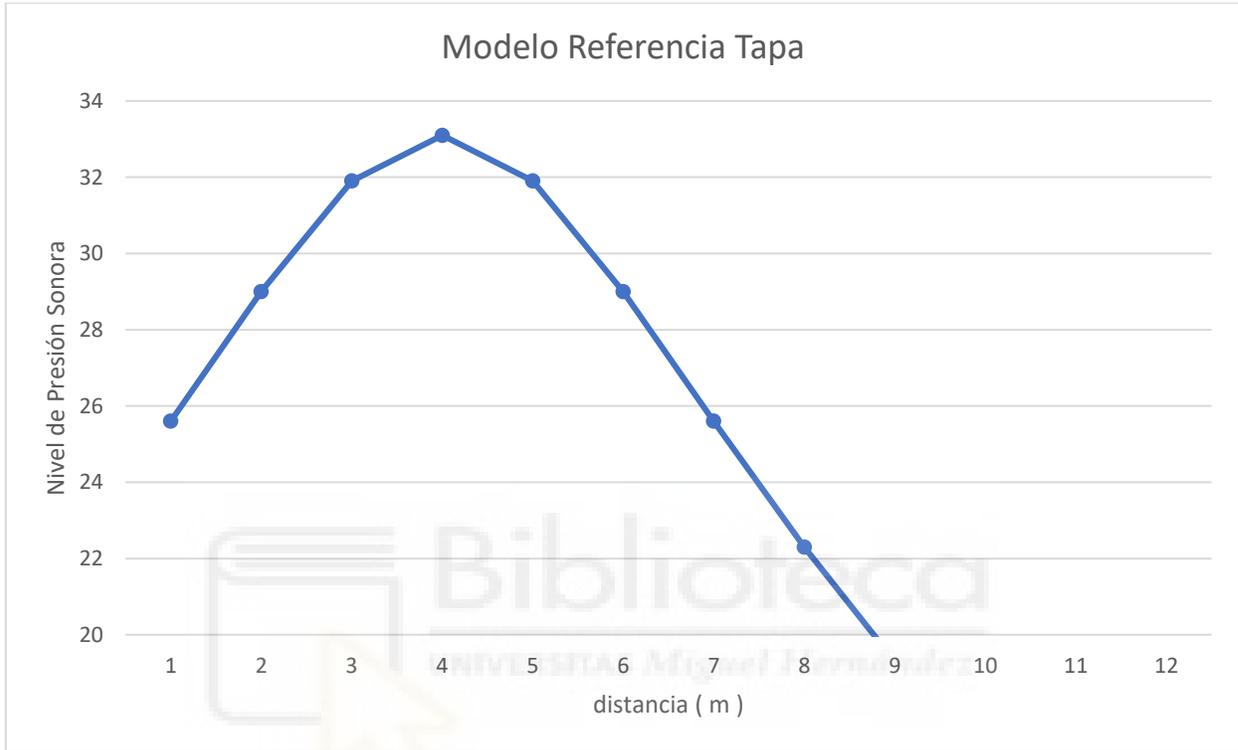


Figura 47: Gráfico de progresión de potencia sonora en Modelo Referencia Tapa.

En la figura 47 se muestra la progresión de la presión sonora, a diferencia de la gráfica del Modelo de Ranura Larga en la Figura 46 se puede apreciar cómo es mucho más baja, además la progresión es totalmente decreciente.

Por último, se muestra una gráfica comparativa de todos los modelos que han empleado como fuente de excitación la técnica de la tapa vibratoria.

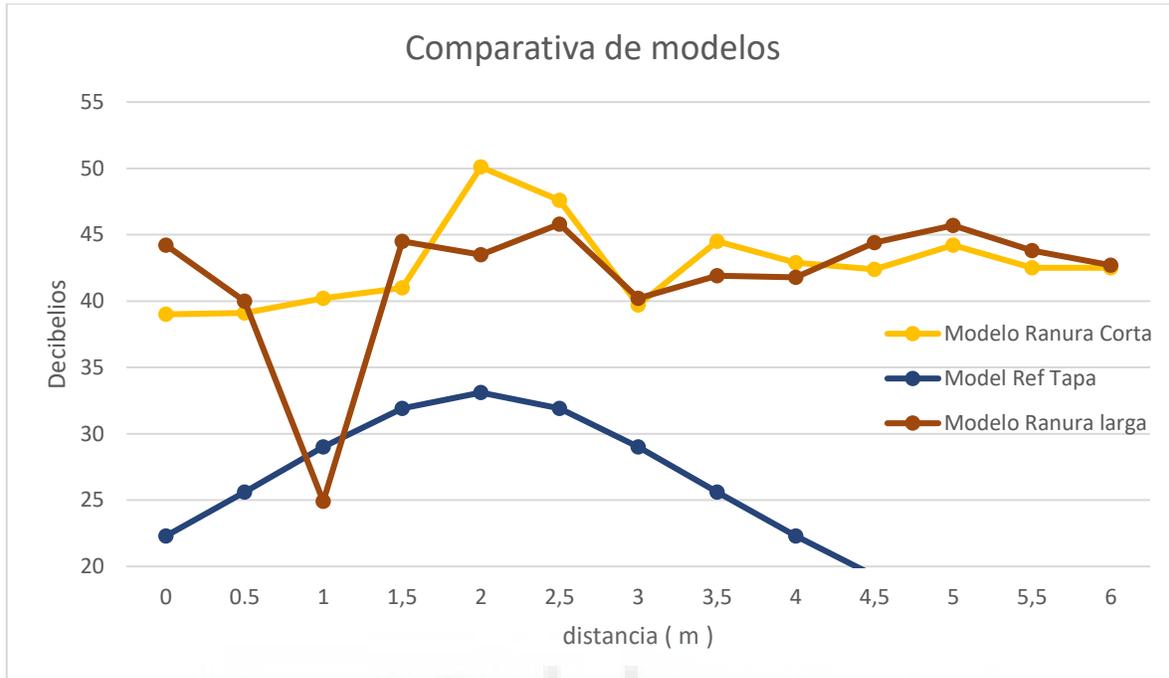


Figura 48: Gráfico comparativo de modelos con tapa vibratoria.

6.4 COMPROBACIÓN A RESISTENCIA DEL MODELO

Con el objetivo de asegurar un buen funcionamiento del modelo de Ranura Larga y además aproximarle un poco más a la realidad se ha realizado un estudio de deformación en Comsol.

Para la realización de esta comprobación, se ha tenido como referencia de propiedades un trámex real, este está fabricado en un acero de tipo S 235 JR, para poder llevar a cabo este cálculo ha sido muy importante contar con el valor de algunas propiedades como son el Módulo de Young, que es idéntico para los aceros (210000 Mpa) el Coeficiente de Poisson (0,3) y la densidad de este acero que es de 7850 kg/m³.

Una vez se dispone de todos los datos necesarios, se pasa a la modelización, que resulta idéntica a la expuesta anteriormente en el Modelo de Ranura Corta, una cosa a destacar es que la plancha se encuentra soldada sobre la canalización, esto es así para beneficiar a las vibraciones durante el paso del vehículo. Para el cálculo se ha tomado como carga

uniformemente repartida un valor de 4000 N que es el peso medio de una cuarta parte de un coche, ya que sobre la tapa caería solo el peso de una rueda ($\frac{1}{4}$ del peso del coche).

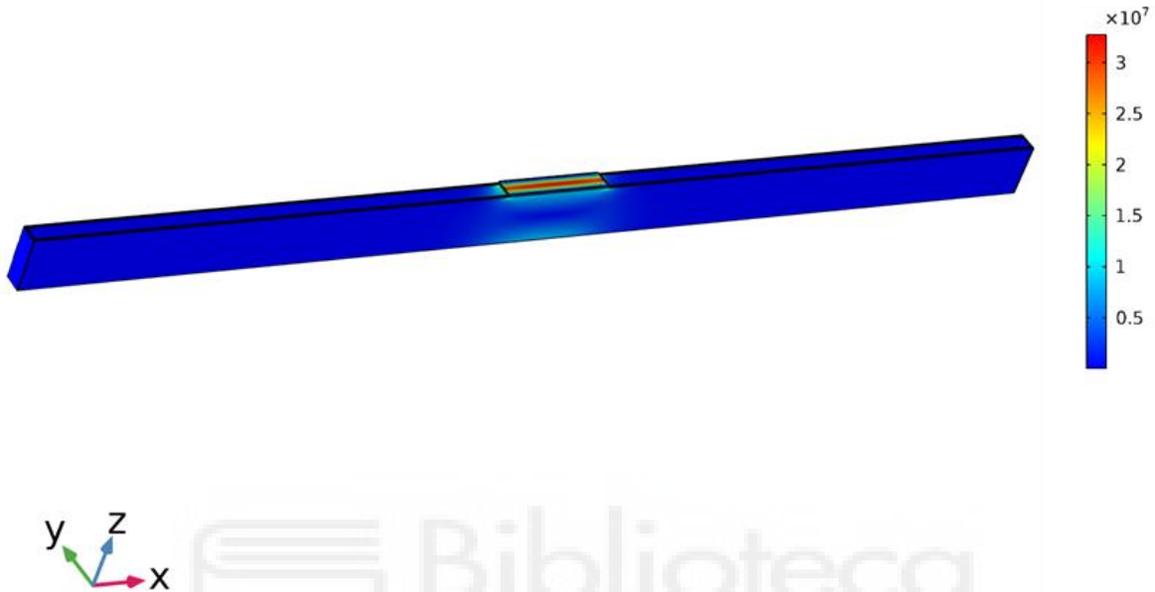


Figura 49: Resultado de tensiones en Modelo Ranura Larga expresadas en pascales.

Una vez realizamos la simulación se obtienen los resultados con diferentes tonalidades de colores que exponen la magnitud de los valores obtenidos.

Para poder ver cual es el valor máximo de las tensiones en la geometría, el cual se ha estudiado mediante el establecimiento del peso de un cuarto del vehículo, que es lo que cae en cada una de las cuatro ruedas, se debe consultar el rango de valores en las opciones de leyenda y situarse en el valor máximo, que en este caso es de $3,27 \times 10^7 \text{ N} / \text{m}^2$ que si se compara con el módulo de deformación de este acero el cual toma un valor de $2,35 \times 10^8 \text{ N} / \text{m}^2$, se puede ver que resiste las cargas de diseño haciendo viable su uso seguro, además ofrece un coeficiente de seguridad de 7.

7 CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

7.1 CONCLUSIÓN

A modo de cierre de este trabajo, se puede señalar que a partir de numerosos estudios anteriormente realizados y una serie de modelos de estudio de interacción neumático / pavimento se ha conseguido entender y enumerar los fenómenos físicos que toman lugar en ella como base del trabajo con la finalidad de comprobar si se incrementa el nivel de presión sonora en la dirección longitudinal pero sin tener un impacto en la propagación transversal y vertical con el objetivo de lograr establecer un sistema de advertencia pero evitando que se generen molestias a la población,

El resultado más relevante de esta investigación es la propuesta de una serie de modelos de metasuperficies cuya función es intentar mejorar la excitación del aire que rodea a la correspondiente geometría de cada modelo (Referencia, Conductos Verticales, Conductos Horizontales, Ranura Corta, Ranura Larga y Modelo Referencia Tapa) y amplificar la emisión sonora actuando como resonadores. En los 3 primeros modelos, a través del uso de una fuente de potencia monopolar, y en los modelos restantes, a través de una aceleración normal de 10 m/s^2 inducida en una pieza de la geometría, se consigue así un efecto parecido al de un neumático pasando sobre ella.

Cabe destacar aquí la relevancia que tiene el uso del cálculo por elementos finitos (FEM) y el de elementos de contorno (BEM), gracias a ellos se puede establecer una serie de condiciones que darán forma al posterior cálculo, como resumen de su uso se puede separar entre FEM para los entornos interiores de las geometrías y BEM para las geometrías externas en espacios abiertos y el aire que se encuentra rodeando al modelo, es decir el aire exterior.

En términos comparativos entre los modelos de metasuperficies, se pueden realizar dos grupos de resultados. El primero de ellos es el de las 3 primeras geometrías, las cuales han usado como medio de excitación la fuente de potencia monopolar. En ellas, como se ha podido apreciar en la gráfica comparativa, se sigue una progresión muy similar destacando

al modelo de Conductos Horizontales como el más eficiente. Por otro lado, el segundo grupo lo conforman los modelos que han empleado la tapa vibratoria. En ellos se reitera lo anterior, la progresión ha sido muy similar, pero destacando una mayor irregularidad en el modelo de Ranura Larga. En este modelo se encuentra un pico grande de presión sonora en el primer metro en la dirección de avance, aunque se puede apreciar cómo ambos modelos incrementan en gran medida el efecto de amplificación de sonido deseado con respecto al modelo Referencia Tapa.

7.2 TRABAJOS FUTUROS

Sería muy interesante poder continuar el estudio realizado en el presente trabajo y poder desarrollar modelos de generación de ruido más realistas y eficientes que los empleados aquí.

Otro punto para avanzar y mejorar es el estudio y diseño de geometrías más complejas, con el fin de poder observar cómo afectan a la presión sonora y su efecto de resonancia.

Un punto final para este estudio sería poder ensayar todos los diseños, tanto los presentados en este trabajo como futuros diseños en la vida real permitiendo que un vehículo circule sobre las geometrías prefabricadas y así ver y medir la cantidad de presión sonora real que se obtiene al contar con la totalidad de fenómenos físicos que ocurrirían en una situación real

REFERENCIAS

- [1] Motor, E. (2022, 9 septiembre). Los coches eléctricos provocan accidentes más caros y con más daños. *El Motor*. <https://motor.elpais.com/coches-electricos/los-coches-electricos-provocan-accidentes-mas-caros-y-con-mas-danos/>.
- [2] Sauras, Á. (2023). ¿Cómo afecta el rozamiento en el consumo de un coche? Autofacil.es. <https://www.autofacil.es/tecnica/como-afecta-rozamiento-coche-consumo/439570.html>.
- [3] Sandberg, U; Ejsmont, J.A. Tyre/road noise reference book. Informex, Kisa, Sweden. 2002.
- [4] ISO 11819-1, Acoustics – Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1: “The Statistical Pass-By Method”. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1997.
- [5] Li, T. (2018). A state-of-the-art review of measurement techniques on tire–pavement interaction noise. *Measurement*, 128, 325-351. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.06.056>.
- [6] Admin. (2021, 11 marzo). *SPB-Messung, statistisches Vorbeifahrt-verfahren - Statistical Pass-by*. Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH. <https://www.akustikforschung.de/en/leistungen/umweltakustik/strassenlarm/spb-statistisches-vorbeifahrt-verfahren/>

- [7] Sandberg, U., & Ejsmont, J. (1984). Three Basic Methods for Measurement Of Tire Road Noise. international conference on noise control. <https://trid.trb.org/view/222357>.
- [8] D. Yang, Z. Wang, B. Li, Y. Luo, X. Lian, Quantitative measurement of pass-by noise radiated by vehicles running at high speeds, *J. Sound Vib.* 330 (7) (2011) 1352-1364.
- [9] W. D. Fonseca, S. N. Y. Gerges, “Development of a low-cost system for pass-by noise beamforming measurements,” in 20th International Congress on Acoustics 2010, ICA 2010 - Incorporating Proceedings of the 2010 Annual Conference of the Australian Acoustical Society, 2010, vol. 3, pp. 2123-2129.
- [10] S.-H.S.-H. Park, Y.-H.Y.-H. Kim, Visualization of pass-by noise by means of moving frame acoustic holography, *J. Acoust. Soc. Am. (USA)* 110 (5) (2001) 2326-2339.
- [11] W. D Fonseca and S.N.Y. Gerges, Development of a Low-Cost System for Pass-by Noise Beamforming Measurements, 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010.
- [12] D. Yang, Z. Wang, B. Li, Y. Luo, X. Lian, Quantitative measurement of pass-by noise radiated by vehicles running at high speeds, *J. Sound Vib.* 330 (7) (2011) 1352–1364.
- [13] Lustberg, R. (1993). *Acoustic beamforming using microphone arrays*. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/12338>
- [14] Tanaka, 2004.

- [15] Park, S., & Kim, Y. (2001). Visualization of pass-by noise by means of moving frame acoustic holography. *The Journal Of The Acoustical Society Of America*, 110(5), 2326-2339. <https://doi.org/10.1121/1.1404976>.
- [16] R.J. Ruhala, C.B. Burroughs, Tire/pavement interaction noise source identification using multi-planar nearfield acoustical holography, in: SAE Technical Papers no 724, 1999.
- [17] T.P. Dare, Generation mechanisms of tire-pavement noise, Purdue University, 2012.
- [18] W.F. Reiter, A.C. Eberhardt, “*Experimental investigation of truck tire noise generated through tire vibration,*” in: Proceedings of INTER-NOISE 74, Washington, D.C., 1974, p. 467.
- [19] Tielking, J. T. (1974). A comparative evaluation of five tire traction models. Highway Safety Research Institute / University of Michigan. <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/2027.42/330/2/28983.0001.001.pdf>.
- [20] Pinnington, R., & Briscoe, A. (2002). A WAVE MODEL FOR A PNEUMATIC TYRE BELT. *Journal of Sound and Vibration*, 253(5), 941-959. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.3944>.
- [21] Shim, T., & Margolis, D. L. (2004). An analytical tyre model for vehicle simulation in normal driving conditions. *International Journal of Vehicle Design*, 35(3), 224. <https://doi.org/10.1504/ijvd.2004.004950>.
- [22] Pacejka, H. B. (2006). *Tyre and Vehicle Dynamics*. Butterworth-Heinemann.
- [23] Hadekel, R. (1952). *The Mechanical Characteristics of Pneumatic Tyres: A Digest of Present Knowledge*.

- [24] Destination Lancaster. (2019, 15 octubre). The Musical Road - Destination Lancaster. <https://destinationlancasterca.org/adventures/musical-road/>.
- [25] Campillo-Davo, N., Peral-Orts, R., Campello-Vicente, H., & Velasco-Sanchez, E. (2019b). An alternative close-proximity test to evaluate sound power level emitted by a Rolling tyre. *Applied Acoustics*, 143, 7-18. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.08.017>.

