

MODELIZACIÓN DEL RUIDO AMBIENTAL MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM), COMO HERRAMIENTA COMPLEMENTARIA A LOS ESTUDIOS REALIZADOS CON CNOSSOS-EU

Soto-Molina, Ignacio^{1,2}, Ausejo Prieto, Miguel³, Arce Ruiz, Rosa María²

¹ Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA-CEDEX), Madrid, España

{e-mail: ignacio.soto@cedex.es}

² Centro de Investigación del Transporte, TRANSyT, Universidad Politécnica de Madrid, España

{e-mail: rosa.arce.ruiz@upm.es}

³ Eurocontrol SA

{e-mail: mausejo@eurocontrol.es}

Resumen

El presente estudio aborda la modelización del ruido ambiental mediante el Método de Elementos Finitos (FEM), como herramienta complementaria a los estudios realizados con CNOSSOS-EU para la evaluación del ruido. CNOSSOS-EU se enmarca en los modelos de predicción de ruido empíricos y semi-empíricos. Estos modelos se basan en fórmulas y algoritmos experimentales para estimar la propagación del ruido. Por el contrario, la metodología FEM emplea métodos puramente teóricos o basados en principios físicos fundamentales. A través de la implementación de FEM, se busca profundizar en el análisis de la propagación del ruido, considerando las complejidades físicas y geométricas específicas del entorno, las cuales son a menudo simplificadas o ignoradas en los modelos empíricos. El enfoque se centra en la comparación y validación de los resultados obtenidos mediante FEM con los proporcionados por CNOSSOS-EU, identificando discrepancias y analizando las causas subyacentes. Este proceso permite una comprensión más detallada de las dinámicas de propagación del ruido, facilitando la identificación de soluciones más precisas y efectivas para la mitigación del ruido ambiental. Los resultados preliminares indican que la integración de FEM con los estudios de CNOSSOS-EU potencia la capacidad de toma de decisiones y el diseño de estrategias de control de ruido.

Palabras clave: Modelización del ruido, Método de Elementos Finitos (FEM), CNOSSOS-EU.

Abstract

This study addresses the modelling of environmental noise using the Finite Element Method (FEM) as a complementary tool to the studies conducted with CNOSSOS-EU for noise assessment. CNOSSOS-EU falls within empirical and semi-empirical noise prediction models. These models rely on formulas and experimental algorithms to estimate noise propagation. In contrast, the FEM methodology employs purely theoretical methods or those based on fundamental physical principles. Through the implementation of FEM, this study aims to deepen the analysis of noise propagation, considering the specific physical and geometric complexities of the environment, which are often simplified or overlooked in empirical models. The focus is on comparing and validating the results obtained through FEM with those provided by CNOSSOS-EU, identifying discrepancies and analyzing the underlying causes. This process allows for a more detailed understanding of noise propagation dynamics, facilitating the identification of more precise and effective solutions for environmental noise mitigation. Preliminary results indicate that integrating FEM with CNOSSOS-EU studies enhances decision-making capabilities and the design of noise control strategies.

Keywords: Noise modelling, Finite Element Method (FEM), CNOSSOS-EU.

1 Introducción

La exposición prolongada al ruido ambiental está asociada con efectos adversos como estrés, trastornos del sueño y enfermedades cardiovasculares, afectando la calidad de vida [1]. La Unión Europea ha ido adoptando políticas para mitigar los efectos del ruido en la salud de las personas y el medio ambiente, destacando la Directiva 2002/49/CE, que establece el marco regulatorio de la evaluación y gestión del ruido ambiental, así como los métodos comunes de evaluación de este.

Desde 2018, CNOSSOS-EU es el método común estandarizado para evaluar el ruido ambiental en Europa, proporcionando un enfoque armonizado [2]. Aunque útil para los fines a los que ha sido diseñado, tiene limitaciones en la precisión de la propagación del sonido en entornos específicos [3]. Por su parte, los cálculos basados en el Método de los Elementos Finitos (FEM) han demostrado su eficacia en la modelización del ruido en entornos complejos [4]. A diferencia de CNOSSOS-EU, el FEM se basa en principios físicos, permitiendo un análisis detallado, posiblemente más apropiado en entornos complejos [5].

Otros métodos numéricos, como el Método de Diferencias Finitas (FDM), el Método de Volúmenes Finito (FVM) y el Método de Elementos de Borde (BEM), también son apropiados en la acústica ambiental [5]. A pesar de sus bondades, el FEM presenta desafíos como alto coste computacional y requisitos de conocimientos avanzados en las formulaciones y algoritmos que se manejan [6].

2 Objetivos

Esta comunicación presenta un avance de un estudio más ambicioso actualmente en desarrollo. El estudio explora el uso del Método de los Elementos Finitos (FEM) como complemento del método CNOSSOS-EU para una evaluación más detallada del ruido en entornos complejos. La integración del FEM podría mejorar la precisión de las evaluaciones, abordando las limitaciones de los modelos empíricos como CNOSSOS-EU, proporcionando una evaluación más precisa, especialmente en la modelización de medidas correctoras, como las pantallas acústicas.

Aunque existen estudios recientes sobre FEM aplicado a la acústica [7], y sobre la aplicación de CNOSSOS-EU y otros métodos empíricos [8], [9], [10], pocos combinan y comparan estas dos metodologías [11]. Por este motivo se considera novedoso el enfoque aplicado en este trabajo.

Esta comunicación se centra en poner de manifiesto las diferencias metodológicas entre ambos métodos y su previsible impacto en los resultados de la simulación.

3 METODOLOGÍA

Se aplican dos enfoques metodológicos, los métodos basados en la Ecuación de Onda implementados con FEM, y dentro de ellos tanto sistemas transitorios como estacionarios, y el método CNOSSOS-EU que aplica una combinación de ecuaciones basadas en la física y resultados experimentales.

La Ecuación de Onda y su derivada, la Ecuación de Helmholtz, se basan en el análisis físico-matemático de la propagación de ondas en el medio de propagación. La Ecuación de Onda se utiliza para modelar la propagación de las ondas sonoras en el tiempo y el espacio (sistemas transitorios), capturando la dinámica temporal de las ondas [12], [13]. La Ecuación de Helmholtz, se centra en la distribución espacial de la presión sonora o intensidad del campo sonoro a una frecuencia específica, siendo adecuada para estudios de estado estacionario [14], [15].

La forma más simple de la Ecuación de Onda (1), para un medio unidimensional puede expresarse como [16]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

donde u es el desplazamiento de la onda en la posición x y en el tiempo t , y c es la velocidad de propagación de la onda en el medio.

La ecuación de Helmholtz (2) es una derivada parcial de la Ecuación de Onda. La forma general de la ecuación de Helmholtz [17] es:

$$\Delta^2 \psi + k^2 \psi = 0 \quad (2)$$

dónde Δ^2 es el operador laplaciano, ψ es la función de onda o el campo que se está estudiando y k^2 es el cuadrado del número de onda, que representa el número de ciclos de una onda por unidad de distancia.

Ambas ecuaciones requieren de la consideración de condiciones de contorno específicas, permitiendo el análisis detallado de la interacción del sonido con estructuras complejas [18] y el estudio adecuado de la propagación del sonido.

A diferencia de las ecuaciones descritas, los métodos empíricos se basan en la técnica de Ray Tracing para calcular una trayectoria sonora hipotética, desde la fuente al receptor, sobre la que se aplican los algoritmos del método. De esta manera, CNOSSOS-EU acelera el estudio de la propagación reduciendo el número de cálculos en cada punto del dominio y simplificando los mismos. El método analiza cómo estos rayos interactúan con el medio a través de reflexiones, refracciones y difracciones [2]. Por este motivo, habitualmente los modelos basados en métodos empíricos son computacionalmente mucho menos exigentes que los basados en FEM.

Aunque CNOSSOS-EU se enmarca en métodos semi-empíricos, que implican una simplificación de la realidad para explicar un fenómeno físico, no se trata de un modelo sencillo, ya que cada uno de los métodos anteriores está compuesto por un gran número de algoritmos, parámetros y condicionantes, siendo realmente complejo de implementar en software [19].

En este trabajo, ambos enfoques (FEM y CNOSSOS-EU) se han aplicado a un escenario tipo, con pantalla acústica, mediante los softwares Elmer FEM, para simulaciones FEM de las ecuaciones de Onda y Helmholtz, y Noise Modelling para simulaciones con CNOSSOS-EU.

El software Elmer FEM [20] fue desarrollado principalmente por el CSC - IT Center for Science en Finlandia y está diseñado para abordar simulaciones complejas en campos como la mecánica de fluidos, transferencia de calor, electromagnetismo y acústica, entre otros.

Noise Modelling [21] está diseñado para producir mapas de ruido ambiental de áreas urbanas, carreteras, ferrocarriles y fuentes industriales. El proyecto Noise Modelling es dirigido por acústicos de la Unidad Mixta de Investigación en Acústica Ambiental (UMRAE, Universidad Gustave Eiffel - CEREMA, Francia) y especialistas en Ciencias de la Información Geográfica del laboratorio Lab-STICC (CNRS - Equipo DECIDE, Francia). Noise Modelling ha sido utilizado en diversos trabajos académicos e institucionales, incluyendo los mapas estratégicos de ruido vial y ferroviario del gobierno francés, los cuales se actualizan periódicamente gracias a una base de datos nacional (PlaMADE) [22].

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Ecuación de Onda proporciona una serie temporal que muestra la evolución de la onda en cada frecuencia y paso de tiempo (**Figura 1**), útil para observar la dinámica del frente de onda y estudiar

fenómenos como la difracción y reflexión en diferentes frecuencias. A frecuencias bajas y en presencia de obstáculos cuya anchura es inferior a la longitud de onda, se aprecia una alta difracción, permitiendo que la onda supere obstáculos con poca atenuación del ruido.

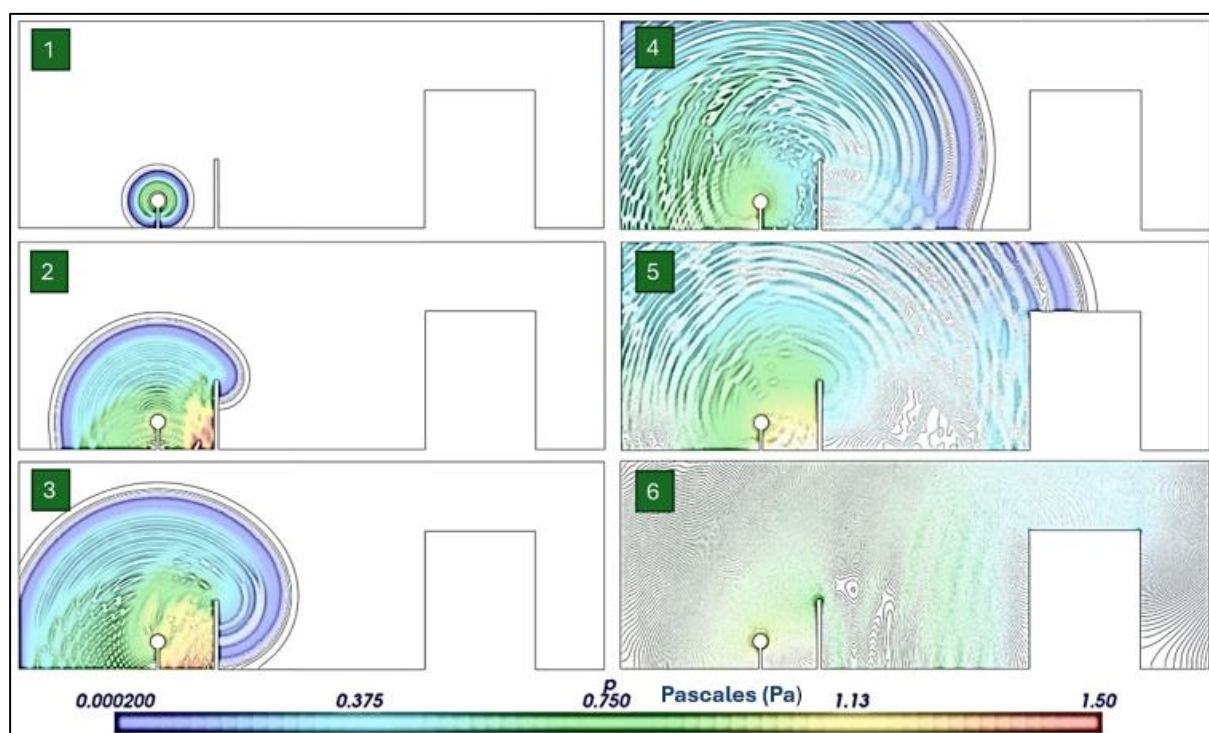


Figura 1: Simulación de propagación de onda de 500 Hz, con una potencia de emisión de 2 Pa (equivalente a 100 dB), y un tiempo de simulación total de 0.2 segundos. Capturas de pantalla cada 0.03 segundos. Software: Elmer FEM. Modelo: Ecuación de Onda.

Este efecto es la causa de la baja efectividad a bajas frecuencias en pantallas acústicas, y ha sido ampliamente estudiado [23]. En contraste, las medias y altas frecuencias muestran menos difracción y, por tanto, una mejor atenuación por obstáculos. Aunque la Ecuación de Onda es útil para entender la propagación, no es ideal para estudios de estado estacionario [24]. En este estudio, se utiliza principalmente para comprender la interacción de las ondas con el entorno acústico, en función del tiempo.

La Ecuación de Helmholtz ofrece un análisis de estado estacionario del campo de presión acústica en el dominio de la frecuencia, representando una situación de equilibrio independiente del tiempo (**Figura 2**). Esto es útil para evaluar la situación acústica a largo plazo, considerando una fuente de ruido en condiciones normales. Los resultados permiten comparar la presión sonora a diferentes frecuencias, mostrando el comportamiento diferente del sonido en función del rango de frecuencias estudiado.

CNOSSOS-EU está diseñado para obtener niveles sonoros medios ponderados A, a largo plazo, modelando el ruido en cada octava de 63 Hz a 8 kHz. Aunque los resultados (**Figura 3**) frecuencia a frecuencia pueden no ser totalmente precisos, en particular en frecuencias bajas, los resultados de nivel continuo equivalente global, ponderado A (L_{Aeq}), en cada periodo de evaluación (L_{den} , L_d , L_e y L_n), son representativos de la realidad [25].

En el caso de las bajas frecuencias, también se observa que las longitudes de onda más cortas sufren menos atenuación que las medias y altas en presencia de obstáculos, aunque las diferencias con estas son menores.

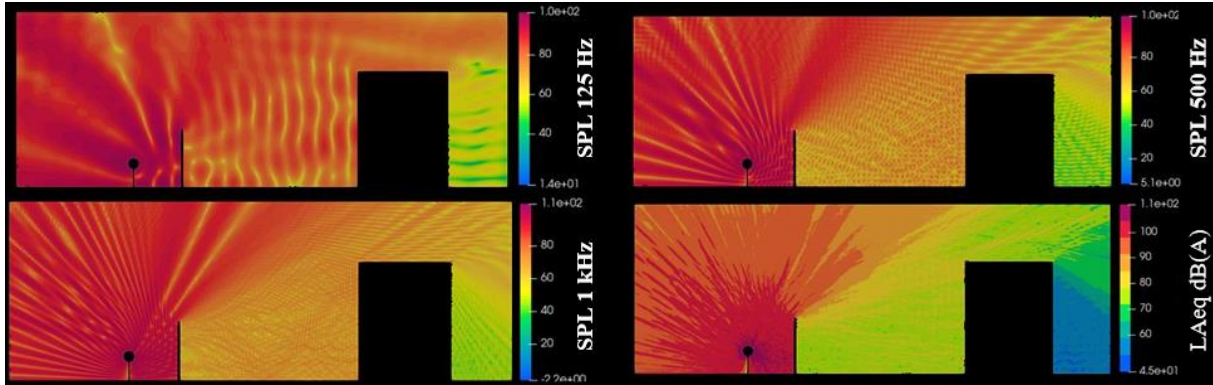


Figura 2: Simulación de propagación de onda con una potencia de emisión de 2 Pa (100 dB en todas las frecuencias). Se representan los resultados de 125 Hz, 500 Hz, 1 kHz (en dB), y LAeq (en dBA). Software: Elmer FEM. Modelo: Ecuación de Helmholtz.

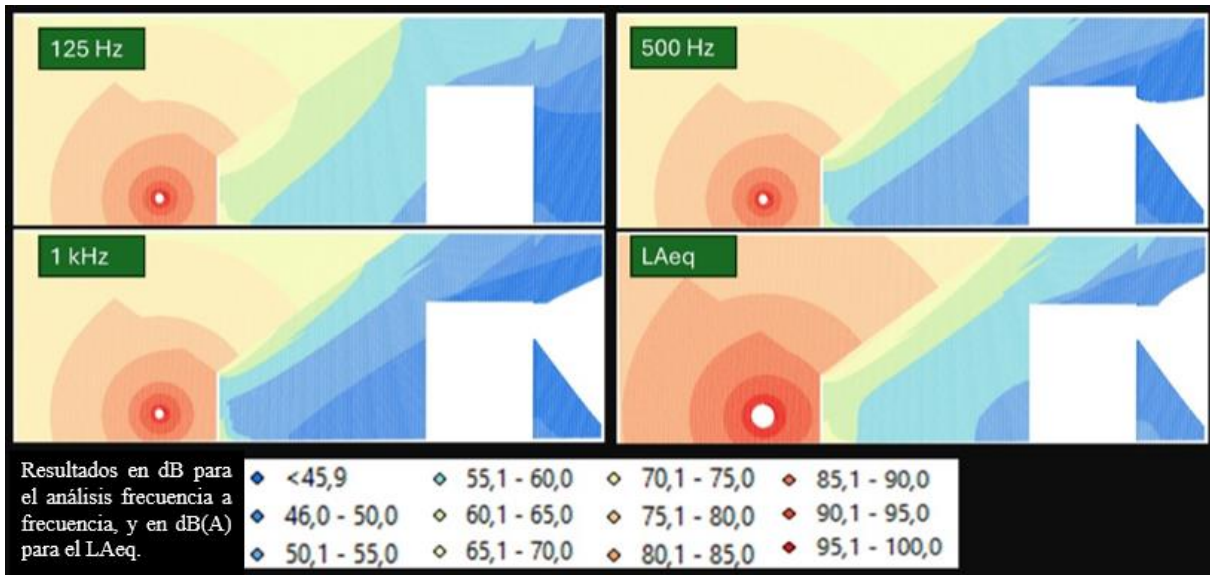


Figura 3: Simulación de propagación de onda con una potencia de emisión de 2 Pa (100 dB en todas las frecuencias). Se representan los resultados de 125 Hz, 500 Hz, 1 kHz (en dB), y LAeq (en dBA). Software: Noise Modelling. Modelo: CNOSSOS-EU.

Comparando los resultados de CNOSSOS-EU y FEM, se observan diferencias significativas en cuanto a la magnitud de los valores SPL y LAeq, arrojados por ambos modelos. Se aprecia también, sin embargo, coherencia en la magnitud de la atenuación, especialmente en frecuencias medias, sugiriendo una relación lineal en la variación del SPL a lo largo del escenario acústico.

5 CONCLUSIONES

Las diferencias fundamentales entre CNOSSOS-EU y los métodos basados en la Ecuación de Onda y Helmholtz se centran en la precisión y la finalidad de uso. CNOSSOS-EU es un método empírico que se enfoca en evaluaciones estratégicas a largo plazo, utilizando simplificaciones y técnicas como el Ray Tracing para obtener resultados rápidos y menos costosos computacionalmente. Esto lo hace menos preciso en el análisis frecuencial de la propagación del sonido, especialmente a frecuencias bajas.

En contraste, la Ecuación de Onda y Helmholtz, basadas en principios físico-matemáticos, permiten un análisis detallado y preciso de la propagación del sonido, capturando complejidades como la difracción

y la reflexión. Los métodos FEM son más adecuados para estudios detallados en entornos acústicos complejos, aunque requieren mayores recursos computacionales y tiempo. La Ecuación de Onda es particularmente útil para estudios transitorios, mientras que Helmholtz es apropiado para el estado estacionario. Ambos enfoques, aunque más precisos en el análisis frecuencial, no están diseñados para las evaluaciones globales a largo plazo, y de grandes superficies, que CNOSSOS-EU maneja más eficientemente.

REFERENCIAS

- [1] C. Clark and K. Paunovic, ‘WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Quality of Life, Wellbeing and Mental Health’, *Int J Environ Res Public Health*, vol. 15, no. 11, p. 2400, Oct. 2018, doi: 10.3390/ijerph15112400.
- [2] S. Kephelopoulos, M. Paviotti, and F. Anfosso-Lédée, ‘Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU)’, European Commission, 2012. doi: <https://doi.org/10.2788/32029>.
- [3] S. Venkataraman, R. Rumpler, S. Leth, M. Toward, and T. Bustad, ‘Improving strategic noise mapping of railway noise in Europe: Refining CNOSSOS-EU calculations using TWINS’, *Science of The Total Environment*, vol. 839, p. 156216, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156216>.
- [4] A. G. Prinn, ‘A Review of Finite Element Methods for Room Acoustics’, *Acoustics*, vol. 5, no. 2, pp. 367–395, Apr. 2023, doi: 10.3390/acoustics5020022.
- [5] S. Marburg and B. Nolte, *Computational Acoustics of Noise Propagation in Fluids - Finite and Boundary Element Methods*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. doi: 10.1007/978-3-540-77448-8.
- [6] G. C. Diwan and M. S. Mohamed, ‘Iterative solution of Helmholtz problem with high-order isogeometric analysis and finite element method at mid-range frequencies’, *Comput Methods Appl Mech Eng*, vol. 363, p. 112855, May 2020, doi: 10.1016/j.cma.2020.112855.
- [7] Y.-Q. Zhou and W.-Y. Luo, ‘A finite element model for underwater sound propagation in 2-D environment’, *J Mar Sci Eng*, vol. 9, no. 9, p. 956, 2021.
- [8] J. Phillips, J. Trow, and S. Shilton, ‘Sensitivity of Input Parameter on CNOSSOS-EU Railway Emission Levels’, in *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Feb. 2023, pp. 4698–4705. doi: 10.3397/IN_2022_0679.
- [9] E. Hartog Van Banda, ‘The three methods of calculating population exposure according to CNOSSOS-EU’, in *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Feb. 2023, pp. 3999–4005. doi: 10.3397/IN_2022_0570.
- [10] A. Tévar, M. Ausejo, L. Simón Otegui, and R. Morales, ‘Benchmark tests to decide the best technology to be applied in large strategic noise mapping’, Aug. 2019. Accessed: Sep. 17, 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/337544789_Benchmark_tests_to_decide_the_best_technology_to_be_applied_in_large_strategic_noise_mapping
- [11] E. Salomons, A. Eisses, and F. van Der Eerden, ‘Effects of Tilted Noise Barriers on Road Traffic Noise’, in *Forum Acusticum*, 2020, pp. 439–446.
- [12] J. le R. d’Alembert, ‘Recherches sur la courbe que forme une corde tendue mise en vibration’, 1747.
- [13] D. R. Lynch and W. G. Gray, ‘A wave equation model for finite element tidal computations’, *Comput Fluids*, vol. 7, no. 3, pp. 207–228, 1979.
- [14] H. Helmholtz, *Wissenschaftliche Abhandlungen*, vol. 1. JA Barth, 1882.
- [15] D. Appello, F. Garcia, and O. Runborg, ‘WaveHoltz: Iterative solution of the Helmholtz equation via the wave equation’, *SIAM Journal on Scientific Computing*, vol. 42, no. 4, pp. A1950–A1983, 2020.
- [16] W. A. Strauss, *Partial differential equations: An introduction*. John Wiley & Sons, 2007.
- [17] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V Sanders, *Fundamentals of acoustics*. John wiley & sons, 2000.

- [18] R. Kechroud, A. Soulaïmani, Y. Saad, and S. Gowda, 'Preconditioning techniques for the solution of the Helmholtz equation by the finite element method', *Math Comput Simul*, vol. 65, no. 4–5, pp. 303–321, May 2004, doi: 10.1016/j.matcom.2004.01.004.
- [19] W. N. Probst, 'Quality assurance for sound calculation software and its limitations', in *Engineering, Computer Science*, Engineering, Computer Science, 2019. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:208003896>
- [20] Peter Råback and Mika Malinen, 'Elmer Documentation: Overview of Elmer', Apr. 2023. Accessed: Apr. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.elmerfem.org/blog/documentation/>
- [21] P. Aumond, N. Fortin, and A. Can, 'Overview of the NoiseModelling open-source software version 3 and its applications.', in *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 2020, pp. 2005–2011.
- [22] P. Aumond *et al.*, 'Strategic noise mapping in France to 2023: Coupling a national database with the open-source software NoiseModelling', Aug. 2022. Accessed: Aug. 29, 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/362733377_Strategic_noise_mapping_in_France_to_2023_Coupling_a_national_database_with_the_open-source_software_NoiseModelling
- [23] S. Sohrabi, T. Pàmies Gómez, and J. Romeu Garbí, 'Suitability of Active Noise Barriers for Construction Sites', *Applied Sciences*, vol. 10, no. 18, 2020, doi: 10.3390/app10186160.
- [24] S. Zhang, J. Zhu, and C.-W. Shu, 'A brief review on the convergence to steady state solutions of Euler equations with high-order WENO schemes', *Advances in Aerodynamics*, vol. 1, Jun. 2019, doi: 10.1186/s42774-019-0019-2.
- [25] T. Džambas, A. Č. Ivančev, V. Dragčević, and Š. Bezina, 'Analysis of road traffic noise in an urban area in Croatia using different noise prediction models', *Noise mapping*, vol. 11, no. 1, p. 20240003, 2024.