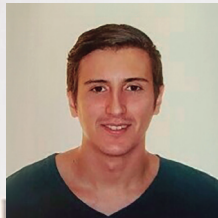


Marco de trabajo para la gestión acústica de espacios de aprendizaje a través de la metodología Building Information Modelling (BIM)



Antonio Jesús Aguilar Aguilera.

Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación, Universidad de Granada.

El análisis del comportamiento acústico es esencial en espacios donde se desarrollan actividades de enseñanza aprendizaje.

Un comportamiento acústico deficiente en las aulas puede repercutir en el rendimiento académico, psicoeducativo y psicosocial de los estudiantes ^[1], así como en su desempeño al realizar las actividades en clase ^[2,3]. Además, la capacidad de identificación e inteligibilidad de la palabra puede verse degradada ^[4] y causar estrés físico y problemas en la voz a los profesores ^[5]. Estudios previos han puesto de manifiesto que un valor de tiempo de reverberación elevado puede producir una baja eficiencia en la comunicación verbal entre profesores y estudiantes, y por lo tanto, puede resultar en un proceso de aprendizaje más lento. La inteligibilidad de la palabra y el rendimiento también se ve degradado por elevados niveles de ruido de fondo (por ejemplo, aulas con una relación señal/ruido negativa) ^[6,7]. Ljung et al. ^[8] y Chetoni et al. ^[9] afirmaron que un ambiente acústico deficiente tiene efectos negativos sobre la percepción del habla, la memoria a corto plazo y la comprensión en general.

Por lo tanto, garantizar unas condiciones acústicas adecuadas es crucial para asegurar la calidad de los procesos de aprendizaje. Este hecho refleja la necesidad de desarrollar un análisis del comportamiento acústico de los espacios interiores desde el propio diseño de los mismos. Normas acústicas nacionales e internacionales establecen los requisitos mínimos que deben cumplir los espacios de enseñanza aprendizaje para garantizar la idoneidad acústica ^[10-12]. El Código Técnico de la Edificación, en su Documento Básico de protección frente al ruido DB-HR, establece los requisitos mínimos de comportamiento acústico de diferentes tipos de espacios, entre los que se incluyen las aulas ^[13]. Por otro lado, la Organización Mundial de la Salud también ha elaborado guías en este ámbito y recomienda que los niveles de ruido de fondo en aulas no superen los 35 dBA ^[14].

[1] Crandell, C. C.; Smaldino, J. J., Classroom acoustics for children with normal hearing and with hearing impairment. *Language, speech, and hearing services in schools* 2000, 31, (4), 362-370. Doi: <https://doi.org/10.1044/0161-1461.3104.362>

[2] Shield, B. M.; Dockrell, J. E., The effects of noise on children at school: a review. *Building Acoustics* 2003, 10, (2), 97-116. Doi: <https://doi.org/10.1260/1351010037689659>

[3] Shield, B. M.; Dockrell, J. E., The effects of environmental and classroom noise on the academic attainments of primary school children. *The Journal of the Acoustical Society of America* 2008, 123, (1), 133-144. Doi: <https://doi.org/10.1121/1.2812596>

[4] Klatt, M.; Hellbrück, J.; Seidel, J.; Leistner, P., Effects of classroom acoustics on performance and well-being in elementary school children: A field study. *Environment and Behavior* 2010, 42, (5), 659-692. Doi: <https://doi.org/10.1177/0013916509336813>

[5] Kristiansen, J.; Persson, R.; Lund, S. P.; Shibuya, H.; Nielsen, P. M., Effects of classroom acoustics and

self-reported noise exposure on teachers' well-being. *Environment and Behavior* 2013, 45, (2), 283-300. Doi: <https://doi.org/10.1177/0013916511429700>

[6] George, E. L.; Goverts, S. T.; Festen, J. M.; Houtgast, T., Measuring the effects of reverberation and noise on sentence intelligibility for hearing-impaired listeners. 2010. Doi: [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2010/09-0197\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2010/09-0197))

[7] Neuman, A. C.; Wroblewski, M.; Hajicek, J.; Rubinstein, A., Combined effects of noise and reverberation on speech recognition performance of normal-hearing children and adults. *Ear and hearing* 2010, 31, (3), 336-344. Doi: [10.1097/AUD.0b013e-3181d3d514](https://doi.org/10.1097/AUD.0b013e-3181d3d514)

[8] Ljung, R.; Sörqvist, P.; Kjellberg, A.; Green, A.-M., Poor listening conditions impair memory for intelligible lectures: implications for acoustic classroom standards. *Building Acoustics* 2009, 16, (3), 257-265. Doi: <https://doi.org/10.1260/135101009789877>

[9] Chetoni, M.; Ascari, E.; Bianco, F.; Fredianelli, L.; Licita, G.; Cori, L., Global noise score indicator for classroom evaluation of acoustic performances

in LIFE GIOCONDA project. *Noise Mapping* 2016, 1, (open-issue). Doi: <https://doi.org/10.1515/noise-2016-0012>

[10] ANSI/ASA S12.60 PART 1. *Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools, Part 1: Permanent Schools*. American National Standards Institute Mellville, USA: Acoustical Society of America, 2010.

[11] Nen 5077. *Delft: Noise Control in Buildings—Determination Methods for Performances Concerning Airborne Sound Insulation of Facades, Airborne Sound Insulation, Impact Sound Insulation, Sound Levels Caused by Technical Services and Reverberant Time*, 2006.

[12] Önorm, B. 8115-2, 2006 12: *Schallschutz und raumakustik im hochbau-teil 2: Anforderungen an den schallschutz*. Österreichisches Normungsinstitut.

[13] Código Técnico de la Edificación (CTE). Documento Básico DB-HR. Protección frente al ruido.

[14] Berglund, B.; Lindvall, T.; Schwela, D., *Guidelines for community noise: World Health*

Evaluar las condiciones acústicas requiere analizar las características geométricas (dimensiones, volumen, forma, etc.) y no geométricas (ubicación de los materiales, características acústicas de los mismos, etc.) de los espacios. La experiencia acústica dentro de una sala está condicionada por los materiales que revisten las superficies. Las propiedades acústicas de los materiales desempeñan un papel importante en el comportamiento acústico debido a que las superficies absorben y reflejan la energía sonora a diferentes niveles y varía según las frecuencias. La calidad acústica puede mejorarse realizando un análisis desde la fase de diseño del proyecto y tomando decisiones como: cambio de materiales con diferentes propiedades acústicas, cambio de la distribución de los asientos en la audiencia, cambio de la posición del orador en el aula, aumentar/reducir la altura de la sala, etc. Si bien estas modificaciones repercuten en otros aspectos del proyecto (ej.: el coste puede aumentar/disminuir debido a estos cambios), es el técnico responsable quien debe de valorar las múltiples variables en su conjunto.

En este contexto, la metodología Building Information Modeling (en adelante, BIM) ofrece una oportunidad a diseñadores, ingenieros y arquitectos para desarrollar este análisis durante la fase de diseño. BIM ha supuesto una revolución en el diseño y ejecución de proyectos constructivos, convirtiéndose en una herramienta fundamental en un sector que tradicionalmente contaba con escasa tecnificación y mecanización de todo el proceso productivo. BIM se define como el proceso para generar, almacenar, gestionar, intercambiar y compartir información del edificio ^[15]. El modelo BIM 3D es una representación digital de las características físicas y funcionales del edificio ^[16]. BIM tiene el potencial de mejorar no sólo los procesos de construcción ^[17], sino también permitir la exploración de otros enfoques alternativos.

Además, la metodología BIM proporciona la oportunidad de aplicar nuevos recursos y técnicas cuyo uso se veía limitado en el sector de la Construcción. Entre ellas destaca el diseño generativo, el cual se define como cualquier práctica de diseño en la que se utiliza un sistema (como un programa o aplicación informática) para producir soluciones al problema de diseño con un cierto nivel de autonomía ^[18]. La limitación temporal ligada al uso de la metodología de diseño tradicional condiciona el proceso de diseño del proyecto, por lo que el número de soluciones potenciales que puede valorar el diseñador son limitadas. Sin embargo, el uso del diseño generativo elimina la limitación temporal y permite explorar un espacio mayor de soluciones. Utilizar un enfoque de diseño generativo implica el uso de algoritmos que generan nuevas soluciones de forma automática, evaluando de forma individual cada solución y clasificándolas.

En este estudio se presenta un marco de trabajo integrado en la metodología BIM para apoyar la toma de decisiones y contribuir a lograr un entorno acústico adecuado en los espacios de enseñanza-aprendizaje desde la fase de diseño de los proyectos. La herramienta propuesta permite explorar diseños alternativos a través del diseño generativo utilizando algoritmos genéticos (concretamente, el algoritmo NSGA-II). La optimización acústica de los espacios se basa en la simulación de los siguientes parámetros: tiempo de reverberación, distribución del nivel de presión sonora (NPS), distancia crítica y distribución de los asientos donde se ubicaran los alumnos. Estos parámetros son simulados a partir de las características arquitectónicas (incluyendo los datos geométricos y no geométricos) almacenadas en el modelo BIM. Finalmente se muestran los resultados obtenidos tras aplicar el marco de trabajo desarrollado a un caso de estudio.

[15] Vanlande, R.; Nicolle, C.; Cruz, C., IFC and building lifecycle management. *Automation in construction* 2008, 18, (1), 70-78. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.05.001>

[16] Azhar, S.; Nadeem, A.; Mok, J. Y.; Leung, B. H. In *Building Information Modeling (BIM): A new paradigm for visual interactive modeling and simulation for construction projects.*, Proc., First International Conference on Construction in Developing Countries, 2008; pp 435-46. Doi:

[17] Aguilar, A. J.; de la Hoz-Torres, M. L.; Martínez-Aires, M. D.; Ruiz, D. P., Development of a BIM-Based Framework Using Reverberation Time (BFRT) as a Tool for Assessing and Improving Building Acoustic Environment. *Buildings* 2022, 12, (5), 542. Doi: <https://doi.org/10.3390/buildings12050542>

[18] Nagy, D.; Lau, D.; Locke, J.; Stoddart, J.; Villaggi, L.; Wang, R.; Zhao, D.; Benjamin, D. In *Project Discover: An application of generative design for architectural space planning.* Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design, 2017; pp 1-8. Doi:

Metodología

El marco de trabajo propuesto ha sido desarrollado utilizando el software de diseño BIM Autodesk Revit® 2021 y el software para la edición de algoritmos Dynamo. Ambos programas han sido utilizados para el desarrollo de la herramienta con el objetivo de optimizar las funciones definidas por el usuario y obtener las soluciones óptimas (frente de Pareto). La Figura 1 muestra las 4 fases que componen el marco de trabajo desarrollado.

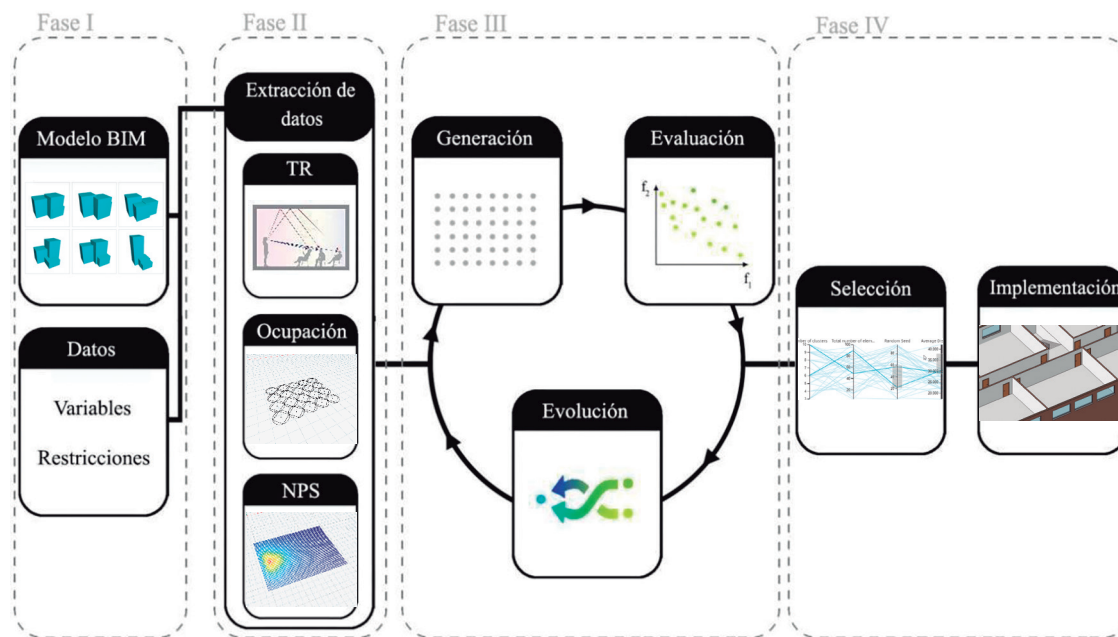


Figura 1. Estructura del marco de trabajo propuesto.

En la Fase I se realiza el diseño del modelo BIM, así como la incorporación de la información necesaria para el posterior proceso de evaluación y optimización. El modelo inicial diseñado en BIM debe contener la información geométrica y no geométrica de los espacios (ej.: propiedades de los materiales de acabado, etc.). En esta fase, se debe seleccionar el espacio interior objeto de estudio, identificando la habitación y la posición que ocupará el orador.

En la Fase II el marco de trabajo extrae desde Dynamo los datos contenidos en el modelo BIM del espacio previamente seleccionado. A partir de estos datos se realiza una evaluación inicial (se calcula el tiempo de reverberación, el número de asientos, ubicación de asientos en el plano de audiencia, distancia crítica media y distribución del NPS) a partir del diseño original.

En la Fase III, tras el proceso de evaluación, si el resultado no es el adecuado, se procede a la aplicación del proceso de diseño generativo en Dynamo. En esta fase se produce el proceso de optimización a través de algoritmo NSGA-II, que producirá las diferentes soluciones óptimas acorde a las variables de entrada y restricciones. En este proceso el algoritmo simula las condiciones acústicas cambiando aspectos de diseño de la sala original, como: (i) cambio de materiales de recubrimiento de paredes, suelo y techo; (ii) cambio de la distribución y número de asientos en la audiencia (modificando la distancia entre los asientos, entre los asientos y las paredes, y entre los asientos y el orador); (iii) cambio de la altura del falso techo y/o (iv) cambio de la posición del orador en la sala. Además, el diseñador debe de fijar cual es el tiempo

de reverberación objetivo (o en qué intervalo debe encontrarse, ej.: 0.5 – 0.7 s), así como qué otras variables quiere optimizar (ej.: minimizar el coste de la solución, maximizar el número de asientos en la sala, minimizar la distancia crítica media, etc.) El resultado final de esta fase es el conjunto de soluciones que optimizan las variables indicadas.

Por último, en la Fase IV, se muestran en la interfaz de Dynamo los resultados obtenidos de la fase anterior. Las soluciones que se visualizan son aquellas que optimizan las variables prefijadas. En esta fase el diseñador procederá a la toma de decisiones: podrá seleccionar entre las propuestas la solución más adecuada e implementarla modificando el modelo BIM.

Resultados

En esta sección se muestran los resultados obtenidos tras la aplicación del marco de trabajo a un caso de estudio. El edificio propuesto tiene un uso docente y consta de diferentes espacios (como aulas, laboratorios, despachos, sala de conferencia, biblioteca, cafetería y almacenes). Una vez modelado el edificio e incorporada toda la información necesaria, se ejecuta la evaluación inicial. El paquete de nodos desarrollado en Dynamo extrae los datos geométricos y no geométricos necesarios para este proceso. Una vez obtenidos los datos, se procede a calcular de forma automática el tiempo de reverberación, la distribución de asientos, el NPS directo y total, y la distancia crítica.

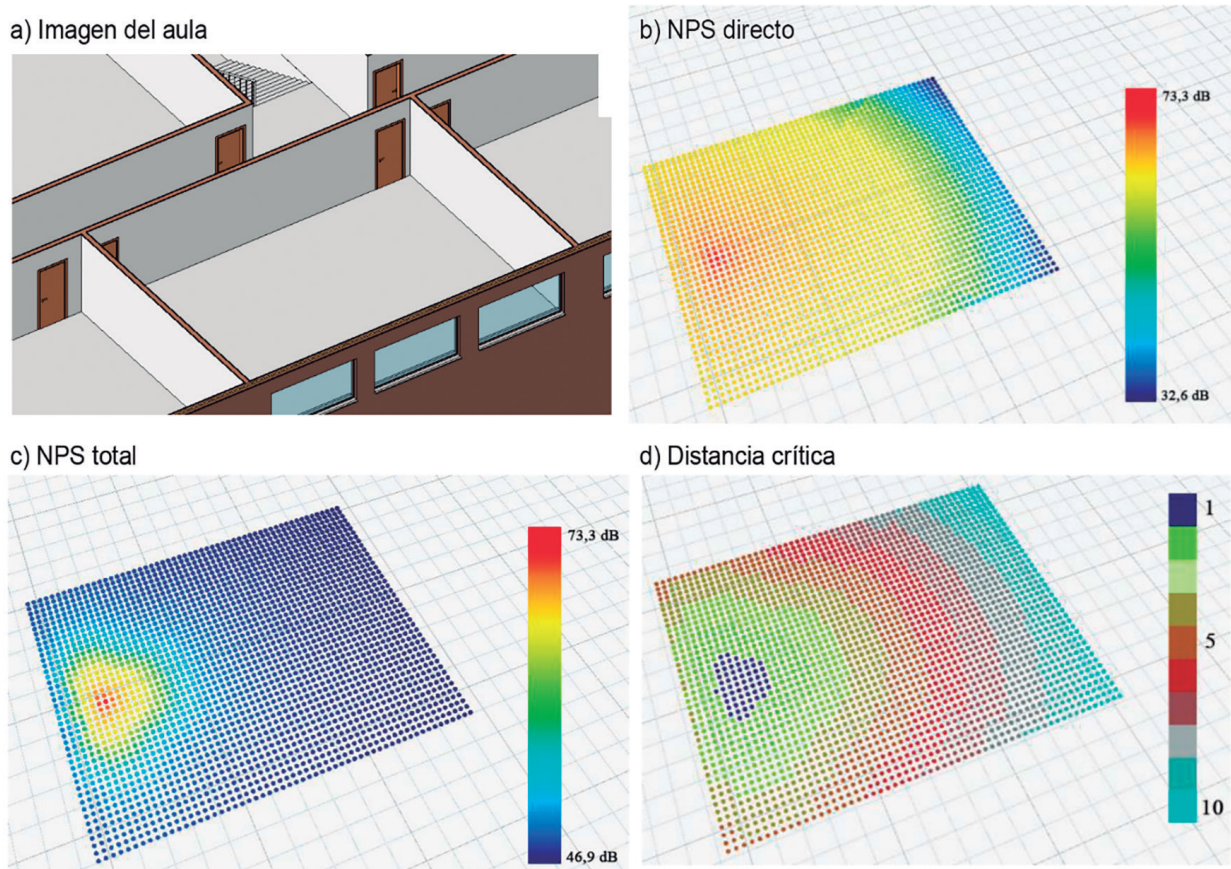


Figura 2.
a) Aula objeto de estudio.
b) Distribución del NPS directo.
c) Distribución NPS total.
d) Distancia crítica a 1k Hz

La Figura 2 muestra el aula seleccionada del edificio (Figura 2a), la distribución del NPS a 1k Hz para el sonido directo (Figura 2b), total (Figura 2c) y la distancia crítica (Figura 2d) obtenida.

Una vez realizada la evaluación inicial y tras comprobar que el tiempo de reverberación no cumple lo establecido en el CTE (es superior 0.7 s), se procedió al proceso de optimización. En este proceso se fijó en el marco de trabajo el tiempo de reverberación objetivo a alcanzar y posteriormente se definieron las funciones objetivo: alcanzar el tiempo de reverberación objetivo, minimizar el coste económico de las nuevas soluciones y minimizar la distancia crítica media, mientras que se buscaba maximizar el número de asientos en la audiencia. La definición de estas funciones se adaptó a las necesidades específicas del caso de estudio, pudiendo ser diferentes y personalizarse para

otros casos. La Figura 3 muestra la visualización de las soluciones obtenidas tras el proceso de optimización en la interfaz de Dynamo. El algoritmo de optimización proporcionó un total de 89 soluciones potenciales. Una de las utilidades que nos proporciona esta herramienta es la posibilidad de filtrar a partir las diferentes variables para ajustar más las soluciones a las necesidades del proyecto. Por ejemplo, si realizamos un filtro en el número de asientos (intervalo de aceptación: 55 – 60 asientos) y en el coste económico de la solución propuesta (intervalo de aceptación: 6.400 – 8.000€), obtenemos que el conjunto de soluciones se reduce a un total de 20.

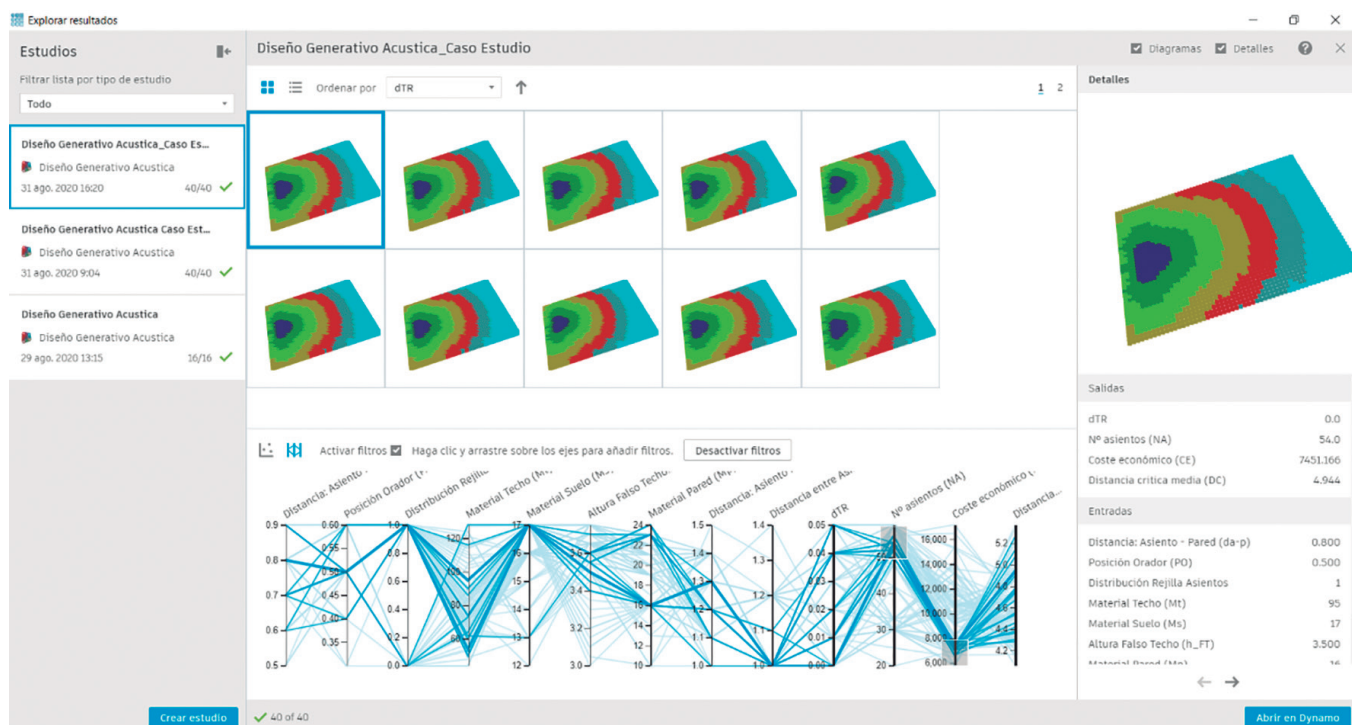


Figura 3. Resultados obtenidos del proceso de optimización.

Conclusiones

El marco de trabajo propuesto se constituye como una herramienta para la gestión del acondicionamiento acústico interior en espacios de enseñanza aprendizaje en etapas iniciales de diseño. Con este propósito se implementó el algoritmo genético NSGA-II para la generación de nuevas soluciones de diseño.

Los resultados obtenidos tras su aplicación al caso de estudio muestran que el espacio de soluciones valoradas es superior al que puede ser analizado utilizando metodología tradicional, ya que se reduce el tiempo requerido en realizar las simulaciones. Además, las soluciones obtenidas están alineadas con los objetivos predefinidos por el diseñador (ej.: alcanzar tiempo de reverberación objetivo, minimizar el coste, etc.), permitiendo evaluar múltiples parámetros al mismo tiempo y garantizando el correcto comportamiento acústico. Por otro lado, cabe destacar que el uso de este tipo de técnicas de diseño generativo tiende a un enfoque de diseño divergente, explorando resultados novedosos y creativos. La aplicación del marco de trabajo desarrollado permite descubrir soluciones que no habría sido posible valorar con la metodología tradicional.

En resumen, la presente propuesta permite a los diseñadores tomar decisiones durante la fase de diseño del proyecto que contribuirán a mejorar las condiciones acústicas de los espacios de enseñanza-aprendizaje en los edificios educativos. El marco de trabajo permite personalizar los objetivos a alcanzar y establecer límites a las características de las potenciales soluciones. Este proceso permite realizar una búsqueda más exhaustiva y obtener soluciones personalizadas para los requisitos y necesidades del proyecto. El empleo de la metodología BIM junto con el diseño generativo en el marco de trabajo proporciona una nueva forma de pensar y elaborar proyectos de edificación.

