

El diseño arquitectónico bioinspirado: un lenguaje holístico con respuestas sostenibles y resilientes

Mauro Costa Couceiro⁽¹⁾, Carina Vieira de Oliveira⁽²⁾ y
Mário Ribeiro Manaia⁽³⁾

Resumen: La arquitectura bioinspirada, apoyada por la Inteligencia Artificial (IA), genera diseños que se integran con el entorno natural y construido, considerando necesidades humanas, valores culturales y objetivos de desarrollo sostenible. Se analiza el impacto de los espacios habitables en nuestro bienestar, utilizando la psicología ambiental y del desarrollo. Se han obtenido datos de evaluaciones del desempeño energético de estructuras biomórficas semienterradas, análogas a la construcción con tierra (Smith, 2001). Los cálculos se realizaron para el clima típico de Madrid, mediante simulaciones energéticas dinámicas. Se abordó el balance térmico sin y con climatización en las semanas de diseño de calefacción y de refrigeración para versiones de base y versiones con mejoras. Los resultados preliminares permiten inferir la eficacia de este sistema constructivo en mantener el edificio en situación de confort térmico adaptativo a lo largo de todo el año, para ubicaciones climáticas en España, con demandas de calefacción por debajo de los 18 Kwh/m².a, y sin demandas de refrigeración relevantes. El estudio señaló que el uso de estrategias bioclimáticas pasivas puede ser suficiente para la adaptación del sistema a otras ubicaciones con climas más exigentes, respetando las cifras del standard NZEB o la norma ZEB. En conclusión, el proyecto de investigación bioinspirado aquí expuesto es un proceso evolutivo que requiere una colaboración interdisciplinaria y una reflexión crítica continuas. Con las aplicaciones de estrategias biomiméticas guiadas por la IA se pretende seguir generando soluciones innovadoras y sostenibles para los desafíos actuales de la sociedad y de su interacción con el medio ambiente.

Palabras clave: Diseño biomimético - Psicología ambiental - Inteligencia artificial y natural - Adaptación simbiótica - Simulaciones energéticas dinámicas - Confort térmico adaptativo

[Resúmenes en castellano y en portugués en las páginas 180-181]

⁽¹⁾ **Mauro Costa Couceiro**, investigador integrado del ISTAR-IUL-ISCTE Lisboa, profesor doctor arquitecto, fue recientemente Co-Investigador Principal (Co-Pi) en la Universidad de Coimbra (CES-UC), como parte del Proyecto de Investigación Santa Cruz (FCT 30704). Este proyecto utilizó tecnologías avanzadas para asistir en la preservación y reconstrucción virtual del patrimonio arquitectónico de la UNESCO. Obtuvo su Doctorado en Arquitectura por la ESARQ-UIC Barcelona, School of Architecture (Universitat Internacional de Catalunya), en Barcelona, el año 2009, logrando la calificación de Sobre-

saliente *Cum Laude*, y la distinción de *Doctor Europaeus*. Su investigación se centró en la complejidad de los procesos biológicos, con el objetivo de desarrollar analogías algorítmicas para los campos de arquitectura, urbanismo y diseño industrial. Ha sido invitado a enseñar, investigar y dar consultoría en varias instituciones alrededor del mundo. Sus intereses de investigación incluyen biomimética e inteligencia artificial (IA) aplicada a la arquitectura y al diseño, con especial énfasis en el impacto de las tecnologías de realidad extendida (XR) y diseño algorítmico en la educación y la práctica profesional. También utiliza estas estrategias para la personalización masiva de diseño y arquitectura, buscando soluciones adaptativas y sostenibles a través de la robótica (Industria 4.0).

⁽²⁾ **Carina Vieira de Oliveira**, es una psicóloga portuguesa con un Máster en Psicología del Desarrollo y de la Educación por la Facultad de Psicología de la Universidad de Coimbra. Investigó cómo los entornos naturales benefician el desarrollo saludable de los niños. Es cofundadora de la empresa de turismo “Feel like Heaven” y fundadora del proyecto “Mães Sem Pressa”, que difunde y promueve buenas prácticas de educación parental. Actualmente trabaja como psicóloga y se dedica a estudiar cómo los entornos, en sus diversas capas, influyen en el desarrollo humano.

⁽³⁾ **Mário Ribeiro Manaia**, arquitecto, cursó y completó una licenciatura “pre-Bolonia” en arquitectura en DARQ FCT, Universidad de Coimbra. Cursó el Proyecto Erasmus en EPFL, Lausana, Suiza. Posteriormente cursó y completó el programa Máster en Arquitectura y Sostenibilidad en la UPC School of Professional and Executive Development de Barcelona, con una “Mención Notable”. Siempre interesado por la tecnología, ha adquirido formación certificada en herramientas de diseño bioclimático y software de simulación térmica dinámica, como Climate Consultant, Meteonorm, Ecotect Analysis y Designbuilder. Obtuvo una beca de investigación de la Universidad de Coimbra para el proyecto EMSURE en el área de Eficiencia Energética en Edificios, y es coautor de varios artículos publicados en revistas científicas, libros y actas de conferencias internacionales. Participante habitual en encuentros, seminarios, jornadas y congresos de arquitectura, fue galardonado con el premio al “Mejor Póster Científico” en las Jornadas Casa Passiva 14 de la Universidad de Aveiro. Su experiencia profesional incluye el diseño de proyectos arquitectónicos y bioclimáticos, y la coordinación de proyectos de especialidades, así como la coordinación de la producción informática (CAD, BIM, IA, 3D Rendering) y el monitoreo de obras de construcción.

Introducción

La biomímesis y la sostenibilidad son temas de creciente interés en la investigación y la práctica arquitectónicas (Chayaamor-Heil, 2023). Estos campos buscan inspiración en morfologías y sistemas biológicos para crear edificios e infraestructuras eficientes, duraderos e, idealmente, simbióticos con los distintos biomas.

La arquitectura biomimética y sostenible busca inspiración en la naturaleza para desarrollar estructuras más eficientes y sostenibles. La utilización de cuevas y grutas por varias especies animales, así como por los seres humanos, ofrece una rica fuente de inspiración en este campo.

El oso pardo, la comadreja, la salamandra ciega de Texas y el búho real, utilizan cuevas y grutas como refugio, a menudo por razones térmicas. Los animales que viven en cuevas se conocen como trogloditas o cavernícolas y tienen hábitos muy especiales. Los trogloditas han desarrollado una serie de características adaptativas para sobrevivir en ambientes de cuevas. Por ejemplo, muchos animales cavernícolas han desarrollado la capacidad de hibernar durante los meses de invierno, una estrategia que les permite conservar energía cuando los recursos alimentarios son escasos. Esta adaptación puede aplicarse en la arquitectura biomimética mediante el diseño de edificios que minimizan el uso de energía durante los meses de invierno, utilizando técnicas de aislamiento térmico y aprovechamiento de la luz solar.

Los seres humanos también han utilizado cuevas como refugio desde tiempos inmemoriales, y existen varias razones para ello. Las cuevas ofrecen un ambiente con temperatura estable durante todo el año, protección contra depredadores y los elementos, disponibilidad de recursos importantes, significado cultural o espiritual significativo en muchas culturas, y un costo de vida más bajo en comparación con la construcción y mantenimiento de una casa o refugio.

La arquitectura biomimética y sostenible, que se inspira en las estrategias de supervivencia de los animales y los seres humanos que utilizan las cuevas y grutas como refugio, puede aplicar estas lecciones en la construcción de estructuras más eficientes y sostenibles (Ilieva *et al.*, 2022). Por ejemplo, la estabilidad térmica de las cuevas se puede mejorar mediante la utilización de materiales de construcción que actúan como aislantes térmicos, manteniendo el calor en invierno y proporcionando un lugar fresco en verano. La protección contra plagas y contra los elementos puede lograrse mediante el cuidadoso diseño de entradas bien aisladas que pueden cerrarse fácilmente, y la utilización de materiales de construcción sólidos que ofrecen protección contra el viento, la lluvia y otros fenómenos climáticos.

Además, la ubicación de recursos importantes cerca de las cuevas puede replicarse mediante una cuidadosa planificación de la ubicación de las estructuras, asegurando que estén cerca de recursos importantes, como agua dulce y biomas ricos. La cultura y la tradición también pueden incorporarse en el diseño, creando espacios que tienen un significado cultural o espiritual significativo para la comunidad.

El componente cultural y social es fundamental cuando pensamos en crear espacios agradables para estar, espacios que permitan el desarrollo integral y saludable del ser humano, fortaleciendo no solo su salud física, sino también la mental. En un período post pandemia, donde los trastornos mentales han aumentado y donde gran parte de la población mundial parece estar viviendo con niveles elevados de estrés y ansiedad, urge la necesidad de crear espacios, formas de vivienda y lugares de trabajo que promuevan un efecto protector sobre la salud mental (Lobo & Rieth, 2021).

Varios estudios señalan el efecto protector que el contacto con la naturaleza y elementos naturales (plantas, maderas, vistas naturales) tienen en la salud mental. De esta manera,

los estudios indican que, incluso en lugares cerrados, tener vistas del entorno natural contribuye a una recuperación más rápida en algunas enfermedades y cirugías (Ulrich, 1984; Verderber, 1986; Verderber & Reuman, 1987).

El contacto con la naturaleza, ya sea a través de la exposición visual o de cortas caminatas, promueve una recuperación acelerada en casos de fatiga mental y parece correlacionarse con una mejoría en la calidad del sueño y del bienestar general entre jóvenes y adultos (Berto, 2005; Taylor, 2001; Godbay, 2009; Kellert, 2002). Hoy sabemos que los barrios urbanos que cuentan con más espacios verdes en su entorno presentan menos índices de agresividad, violencia y enfermedades relacionadas con el funcionamiento del corazón (Chawla & Derr, 2014; Nedovic & Morrissey, 2013).

La investigación sobre los beneficios de la conexión con la naturaleza en la salud mental encuentra paralelismo en el enfoque de construcción que busca replicar la eficiencia y la armonía con el entorno natural. Esto se logra mediante técnicas de construcción económicas y ecológicas que respetan y gestionan los recursos de manera sostenible, contribuyendo así a generar hábitats más saludables y en armonía con el entorno.

El bajo coste asociado a la vida en una cueva puede replicarse mediante el empleo de técnicas de construcción con materiales locales, poco procesados y, por lo tanto, económicos, ecológicos y sostenibles. Esto puede ser particularmente valioso para las sociedades más contextualizadas con el bioma, donde los recursos pueden ser gestionados de manera respetuosa. Al aplicar estas morfologías y procesos a nuestros hábitats, podemos generar estructuras más eficientes y sostenibles que están en armonía con la naturaleza (Palumbo, J. 2022).

En este contexto, las formas de catenaria invertida, que se encuentran en cuevas y otras estructuras naturales, pueden dar lugar a estructuras de gran resistencia cuando se utilizan en edificios (*Ver Figura 1*). La forma de catenaria invertida distribuye las cargas uniformemente por toda la estructura, trabajando totalmente a compresión. De este modo se evitan los puntos de tensión concentrada, que pueden provocar el agrietamiento o el fallo de las estructuras.

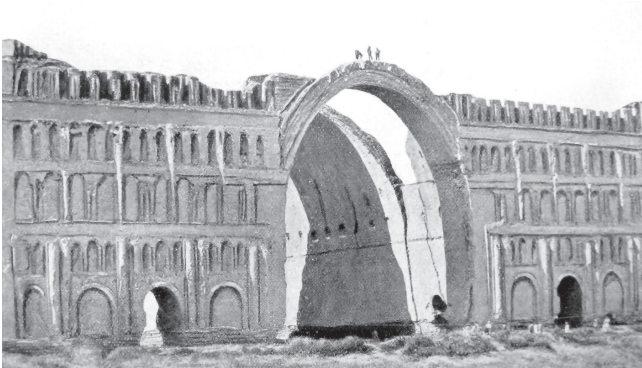


Figura 1. Fotografía de los restos del Palacio Blanco de Ctesifonte (Irak), con el famoso Arco de Ctesifonte, tomada en 1864, antes del derrumbamiento de la fachada derecha.

La fotografía de la *Figura 1* ilustra la influencia duradera de las cúpulas persas en Irak, un testimonio del impacto significativo de la arquitectura persa en la región. Algunos historiadores creen que el fundador es Sapor I (h. 240-270) (Schmidt, 1934). La sala de Iván en arco, abierta por el lado de la fachada, tenía unos 37 metros de altura, 26 metros de diámetro y 50 metros de longitud, el mayor arco en pie construido por el hombre hasta la época moderna. Destaca Ctesifonte, una antigua capital del gran imperio persa, conocida por su impresionante Arco de Ctesifonte o Tak Kasra. La forma catenaria del arco no solo es estéticamente agradable, sino que también contribuye a la resistencia y estabilidad del arco. Esto es un testimonio de la habilidad y conocimiento de los antiguos arquitectos persas y un legado de una tradición arquitectónica que se remonta a las primeras cúpulas de Mesopotamia. Debido a la escasez de madera en muchas áreas del altiplano iraní, las cúpulas de piedra se convirtieron en un elemento importante de la arquitectura vernácula a lo largo de la historia de Persia (Wright, 2009).

Algunos de estos edificios de forma catenaria son hechos de arcilla con paja, también conocida como tapial o adobe. Este material se fabrica mezclando arcilla, agua y algún tipo de material fibroso, como la paja. Aunque la arcilla con paja es un material de construcción ecológico y sostenible, tiene algunas limitaciones. Por ejemplo, puede ser susceptible a la erosión si no se protege adecuadamente del agua, y puede no ser adecuado para todas las condiciones climáticas o tipos de suelo. La cal hidráulica natural se emplea tradicionalmente para aislar muros de adobe. Se utiliza para consolidar y estabilizar viejos sustratos friables y regular la absorción de agua antes de aplicar el nuevo revestimiento. Este material se fabrica mezclando cal, agua y algún tipo de material fibroso, como la paja.



Figura 2. Simulaciones de lo que podría ser, hace siglos, el actual Parque Urbano de Palmenti, ubicado en Pietragalla, Italia. Es un destacado ejemplo de arquitectura rupestre que refleja la civilización campesina lucana. Estas estructuras, caracterizadas por su diseño y ubicación, ofrecen una notable estabilidad térmica, similar a la de las cuevas naturales. Por esta razón, aun en la actualidad, estas edificaciones rocosas, albergan depósitos excavados en la roca tobácea para el procesamiento y fermentación de la uva (Cillis, 2020).

El hormigón fibroso puede ser una alternativa al adobe porque es más resistente. Es posible aplicar hormigón fibroso en forma de catenaria invertida totalmente a compresión, incluso sin armadura. La forma de catenaria invertida, permite al hormigón soportar todas las fuerzas mediante compresión, que son las principales fuerzas a que este puede resistir (Villaga, 2009).

Es un tipo de hormigón que incluye fibras cortas y finas distribuidas uniformemente por toda la mezcla. Las fibras pueden ser de diversos materiales, como acero, polipropileno o, idealmente, fibras naturales o reutilizadas. Hay tipos de hormigón fibroso que se consideran más respetuosos con el medio ambiente. Por ejemplo, hay empresas que desarrollan hormigón estructural fabricado a partir de residuos de construcción y demolición y subproductos de la industria siderúrgica o de basura de plásticos. La adición de fibras al hormigón puede mejorar varias propiedades, como la resistencia a la tracción y a la flexión, la durabilidad y la resistencia al impacto. Las fibras añadidas a la mezcla de hormigón aumentan la resistencia a la tracción del material. Esto puede ayudar a controlar el agrietamiento, que es una de las principales causas de fallo en las estructuras de hormigón. Para sustituir la cal hidráulica natural existen diversos impermeabilizantes líquidos que pueden aplicarse a las cubiertas de hormigón fibroso para que reciban grava, tierra y sustrato para las raíces de las plantas y para el micelio. Estas capas superiores, también ellas llenas de fibras vivas y que siguen la forma de la catenaria invertida, pueden dar lugar a estructuras muy resistentes.

Algunos ejemplos comunes de estructuras subterráneas en las que se suele utilizar hormigón son los túneles, las estaciones de metro, los búnkeres y refugios subterráneos y los edificios subterráneos. La forma del túnel suele ser de arco o cúpula, lo que resulta eficaz para distribuir las cargas mediante compresión.

Entre los arquitectos famosos que han utilizado estructuras de compresión, reforzadas por su forma, figuran Antoni Gaudí, Pier Luigi Nervi, Félix Candela, Heinz Isler y Frei Otto (The Constructor, 2021).

Biomimesis y la Inteligencia Artificial

La Inteligencia Artificial (IA) juega un papel crucial en todo el proceso biomimético. No solo los sistemas neuronales digitales son en sí mismos una imitación de nuestros sistemas neuronales naturales, sino que los procesos que estos simulan permiten la adaptación de formas arquitectónicas a condiciones ambientales (Krichmar, *et al.*, 2019). De la misma manera, la IA permite optimizar el uso de materiales y la eficiencia energética, permitiendo la supervivencia de los edificios más aptos (Darwin, 1859).

La IA se utiliza para simular condiciones del mundo real, proporcionando una experiencia realista e interactiva del diseño. En el software *Kangaroo*, que es un complemento para *Grasshopper* que se utiliza dentro del entorno *Rhino*, se puede simular la física del mundo real en tiempo real, lo que significa que podemos ajustar e interactuar con nuestros modelos mientras las simulaciones están en ejecución.

Para iniciar una simulación, es necesario referenciar los puntos de anclaje. Para obtener un efecto de cadena colgante, definimos el vector de gravedad. Luego, invertimos los sentidos de la gravedad para ver inmediatamente las adaptaciones del modelo para mantenerse siempre a la compresión. Es posible crear una serie de superficies de catenaria adyacentes donde los puntos de esquina están a alturas variables, un sistema que se asemeja en casi todo a los modelos analógicos estereo-funiculares de Gaudí. Es un útil proceso de exploración y descubrimiento de formas óptimas según los criterios y restricciones específicos de la topografía, contextos geológicos y biológicos, de los materiales disponibles, de las fuentes energéticas, de los recursos humanos, tecnológicos, programas funcionales, entre otros innumerables factores.



Figura 3. Diseño arquitectónico de un mercado optimizado por Inteligencia Artificial: Este diseño arquitectónico de un mercado muestra cómo la IA puede adaptar las formas arquitectónicas a las condiciones ambientales y optimizar el uso de materiales. La estructura del techo curvado, hecho de un sandwich de ladrillos y hormigón armado, es un ejemplo de cómo la IA puede simular la física del mundo real y ajustar la forma de la estructura para minimizar el uso de material.

En este caso, utilizamos *Kangaroo* principalmente para ajustar la forma de la estructura, para minimizar el uso de material, o para garantizar que la estructura pueda soportar una cantidad virtualmente interminable de cargas a la compresión. La IA ayuda en la generación de intención y forma arquitectónica, apoyando nuestros modelos teóricos académicos y de trabajo, promoviendo la innovación tecnológica y, así, mejorando la eficiencia del diseño y producción arquitectónicos (Yuan, 2023). Entre las varias formas de IA disponibles para arquitectos y diseñadores que nos ayudan en la adaptación de nuestros proyectos construidos al bioma contextual, destacamos *Adobe*, *AI Architecture*, *ARCHITEChTURES*, *ArkDesign.ai*, *Arko.ai*, *BricsCAD BIM*, *ClickUp*, *Kaedim*, *Luma.ai*, *Maket.ai*, *Midjourney*, *Sidewalk Labs*, *Sloyd.AI*, *Tech for Architects*, *Veras*. Cabe señalar que la aplicación de IA en simulaciones arquitectónicas es un campo en rápido desarrollo, y se están desarrollando regularmente nuevas técnicas y herramientas (Ver Figuras 2 y 3).

Metodología del Estudio Térmico Preliminar

El estudio se realizó en 4 fases. En la **primera fase** fue desarrollado el algoritmo de la generación paramétrica de estructuras paraboloides, según estrategias biomiméticas guiadas por la IA. La **generación de estructuras** estereo-funiculares de catenarias invertidas se desarrolló sobre una programación algorítmica paramétrica en base Rhino/Grasshopper, con interacciones varias con otras IAs específicas. Una vez más, como en el cerebro humano, las redes neuronales se especializan por módulos. Esta biomimética permite que “pequeñas” redes neuronales tengan la capacidad de general soluciones viables rápidamente (Portalatin-Mendez & Doe, 2019).

En la **segunda fase** fue seleccionado un modelo-prueba con dimensiones adecuadas para una habitación familiar (2 adultos + 2 niños). Esta tipología fue seleccionada por ser muy común en el mercado, por disponer de un amplio conjunto de datos públicos de desempeño térmico, y así permitir hacer comparaciones más realistas y con cifras más conocidas de la mayoría de las personas. En esa fase también se desarrolló en predimensionado de aleros, a partir de un cálculo de radiación solar incidente en la fachada sur.

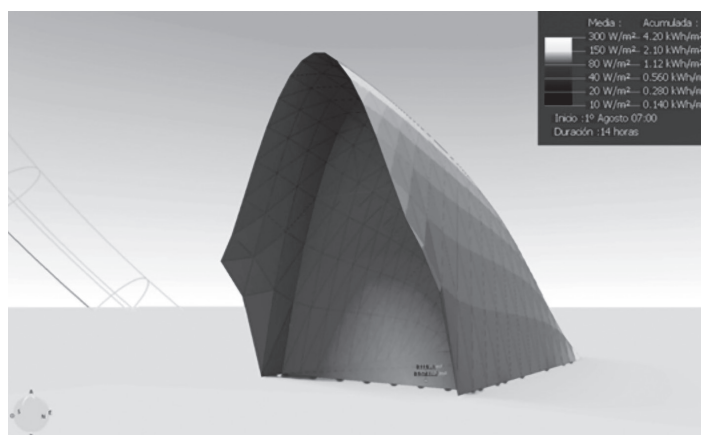


Figura 4. La imagen es un renderizado en 3D de un edificio con un mapa codificado por colores de la radiación solar en su fachada. Representa el cálculo de la radiación solar diaria en la fachada de un edificio en el norte de España, el 1 de agosto. Los colores, representados en esta publicación como tonos de gris, van del rojo (más claro, que indica alta radiación) al azul (más oscuro, que indica baja radiación). Este gradiente de colores ofrece una representación visual de cómo varía la radiación solar en la fachada del edificio. El cálculo de la radiación solar diaria se desarrolló en Archiwizard 12, una herramienta informática utilizada para el análisis térmico y solar de edificios.

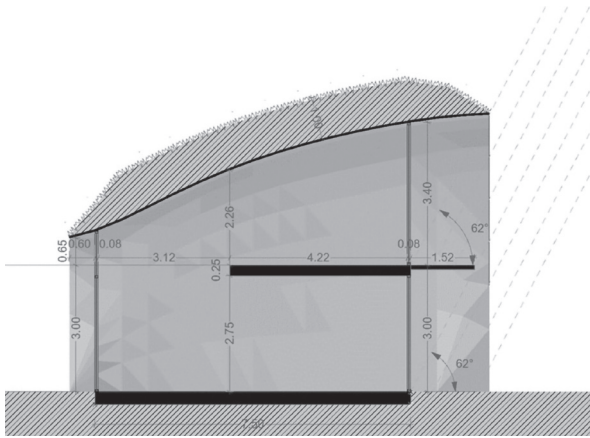
En la **tercera fase** el modelo-prueba fue programado en Designbuilder (2023). A partir de una predefinición de constitución de elementos constructivos y del programa familiar, al modelo fueron aplicados perfiles (construcción, ocupación, iluminación, ventilación) y fue desarrollada una serie de cálculos numéricos primarios para las semanas de diseño de invierno (calentamiento) y verano (refrigeración), para el clima de Madrid, representativo de algunos de los más exigentes y extremados del espacio mediterráneo. Es del tipo “Csa” según la clasificación Köppen-Geiger (Kottek, *et al.* 2006) y 3C según la clasificación climática ASHRAE (2020). También conocido como “clima mediterráneo típico”, veranos secos, calurosos y con temperaturas medias por encima de los 22°C, e inviernos húmedos y lluviosos, con temperaturas mínimas superiores a -3°C. Ese tipo climático se puede encontrar en zonas occidentales o en el interior de continentes, como en la cuenca del mediterráneo, partes de California y Chile, partes del subcontinente indiano o de la zona sudoeste de Australia (Kottek, *et al.* 2006).

En la **cuarta fase** se analizaron los resultados, se plantearon discusiones, y a partir de ello se sugirieron medidas de mejoría a través de la revisión y/o de nuevas estrategias bioclimáticas. Por último, fue evaluado el desempeño energético anual, considerando equipos de HVAC (demandas de calefacción y refrigeración anuales) tras el desarrollo de una nueva serie de simulaciones dinámicas (*Ver Figura 4*).

Predimensionado y Criterios de Construcción

El modelo-prueba seleccionado tiene una planta baja rectangular de 7,34m de longitud por 5,0m de ancho y 2,75m de altura, y una primera planta en “mezanine” de 4,22m de longitud por 3,5m de ancho y 2,5m de altura promedio. La membrana catenaria, con la doble función de pared y cubierta, tiene una capa sencilla de contrachapado marino de 30mm y una membrana impermeabilizante y drenaje periférico, con capacidad para soportar hasta 2 metros de tierra en la cubierta. El forjado de la planta baja es de hormigón armado (8cm), sobre capa de relleno de hormigón ligero (15cm), membrana impermeabilizante y drenaje periférico y capa de drenaje de grava (20cm).

A nivel de aislamiento térmico, fue preconcebido que, una vez que el edificio estuviera semienterrado y cubierto de tierra, esta sirve como “amortiguador térmico” de gran inercia para hacer frente a las grandes variaciones estacionales de temperatura. Las paredes presentan un coeficiente de conductibilidad térmica (U) de 0,51W/m².k, la cubierta de 0,87W/m².k, y el forjado de 1,08W/m².k. Los marcos de ventanas y puertas acristaladas se consideraron convencionales de madera y cristales dobles (6 + 13 aire + 6), con un U de 2,6W/m².k y un factor solar de 0,5 (*Ver Figuras 5 y 6*).



5

Figura 5.
Sección longitudinal del modelo-prueba.

Figura 6.
Propiedades termofísicas de los elementos constructivos, producido en Designbuilder: a) pared exterior; b) cubierta; c) forjado de planta baja.

a)		b)		c)	
Inner surface		Inner surface		Inner surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	2.152	Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	4.460	Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	0.342
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5.540	Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5.540	Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5.540
Surface resistance (m ² -K/W)	0.130	Surface resistance (m ² -K/W)	0.100	Surface resistance (m ² -K/W)	0.170
Outer surface		Outer surface		Outer surface	
Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	19.870	Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	19.870	Convective heat transfer coefficient (W/m ² -K)	19.870
Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5.130	Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5.130	Radiative heat transfer coefficient (W/m ² -K)	5.130
Surface resistance (m ² -K/W)	0.040	Surface resistance (m ² -K/W)	0.040	Surface resistance (m ² -K/W)	0.040
No Bridging		No Bridging		No Bridging	
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	0.558	U-Value surface to surface (W/m ² -K)	0.989	U-Value surface to surface (W/m ² -K)	1.394
R-Value (m ² -K/W)	1.963	R-Value (m ² -K/W)	1.152	R-Value (m ² -K/W)	0.927
U-Value (W/m²-K)	0.509	U-Value (W/m²-K)	0.868	U-Value (W/m²-K)	1.079
With Bridging (BS EN ISO 6946)		With Bridging (BS EN ISO 6946)		With Bridging (BS EN ISO 6946)	
Thickness (m)	2.0400	Thickness (m)	1.0400	Thickness (m)	0.4910
Km - Internal heat capacity (KJ/m ² -K)	127.1480	Km - Internal heat capacity (KJ/m ² -K)	127.1480	Km - Internal heat capacity (KJ/m ² -K)	208.4800
Upper resistance limit (m ² -K/W)	1.963	Upper resistance limit (m ² -K/W)	1.152	Upper resistance limit (m ² -K/W)	0.927
Lower resistance limit (m ² -K/W)	1.963	Lower resistance limit (m ² -K/W)	1.152	Lower resistance limit (m ² -K/W)	0.927
U-Value surface to surface (W/m ² -K)	0.558	U-Value surface to surface (W/m ² -K)	0.989	U-Value surface to surface (W/m ² -K)	1.394
R-Value (m ² -K/W)	1.963	R-Value (m ² -K/W)	1.152	R-Value (m ² -K/W)	0.927
U-Value (W/m²-K)	0.509	U-Value (W/m²-K)	0.868	U-Value (W/m²-K)	1.079

6

Análisis Numéricos

En la fase 3 fueron desarrolladas simulaciones dinámicas horarias para las semanas de diseño de invierno (calentamiento) y verano (refrigeración), en el clima tipo de Madrid. No se consideraron equipos de HVAC (climatización). O sea, se deseó evaluar solamente el desempeño térmico en función de las estrategias bioclimáticas y de diseño iniciales. Se consideró una tasa de renovación horaria de 0,5Rph (renovaciones por hora), de acuerdo con la norma EN 16798 -1:2019 (European Committee for Standardization, 2019). Se consideró un perfil de ocupación de 0,07 personas/m² (3,5 personas en 51,5 m² de área de forjados interiores, ó 105m³ de volumen de aire interior), así como perfiles de iluminación de 100lux/m² y de cargas térmicas adicionales de 8w/m², bajo un perfil horario de uso

habitacional convencional. Se utilizó el motor de cálculo EnergyPlus v9.4 y la interfaz de usuario Designbuilder v7.2.0.032 (2023).

Resultados Preliminares y Discusión

En los **resultados preliminares** del desempeño energético del edificio en la **semana de diseño de invierno**, puede identificarse que el desarrollo de la curva de temperatura operativa interior (media entre la temperatura del aire y la radiante) es casi paralelo a la curva de la temperatura exterior, pero con una amplitud térmica casi constante entre las dos curvas de cerca de 15 grados. Aunque la mayoría de las temperaturas interiores se planteen dentro del rango de “confort” (18-23°C), se verifica una amplitud entre las temperaturas interiores máximas y mínimas diarias de la misma escala de las temperaturas exteriores, o sea, poca estabilidad térmica y demasiadas horas con temperaturas por debajo y por encima del rango de confort.

A nivel de los flujos de calor, puede identificarse muy claramente la influencia de los componentes constructivos, sobre todo del forjado, que funcionan como “amortiguadores térmicos”. Se verifica que la “captación” de calor por esos elementos es mayor cuanto mayores son las ganancias térmicas solares, y parte de ese calor guardado en las “pilas térmicas” de las paredes y cubierta (tierra) y el forjado (hormigón) es echado de vuelta al espacio cuando las temperaturas interior y exterior bajan. Queda muy claro que la influencia de las ganancias solares es preponderante y suficiente para calentar el espacio muy deprisa, incluso por encima del rango de “confort”.

De los datos analizados, puede sugerirse, como **medidas de mejoría**, el incremento de la inercia térmica interior sobre todo en las paredes y techo, vidrios de baja emisividad (y con un coeficiente de transmisión térmica más reducido), o la instalación de dispositivos activos de sombreado, como cortinas, para controlar y bajar los picos de ganancias solares, y así obtener una menor amplitud térmica diaria.