

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.

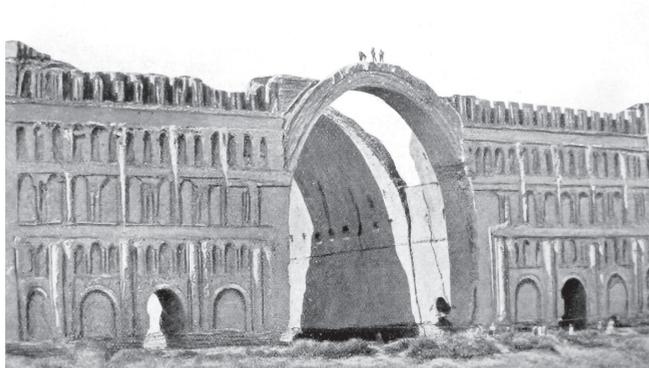


Figura 1. Fotografía de los restos del Palacio Blanco de Ctesifonte (Irak), con el famoso Arco de Ctesifonte, tomada en 1864, antes del derrumbamiento de la fachada derecha.

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.

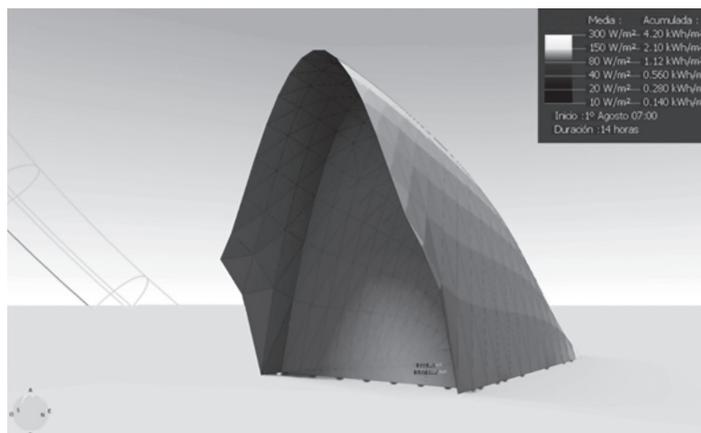


Figura 4. La imagen es un renderizado en 3D de un edificio con un mapa codificado por colores de la radiación solar en su fachada. Representa el cálculo de la radiación solar diaria en la fachada de un edificio en el norte de España, el 1 de agosto. Los colores, representados en esta publicación como 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.

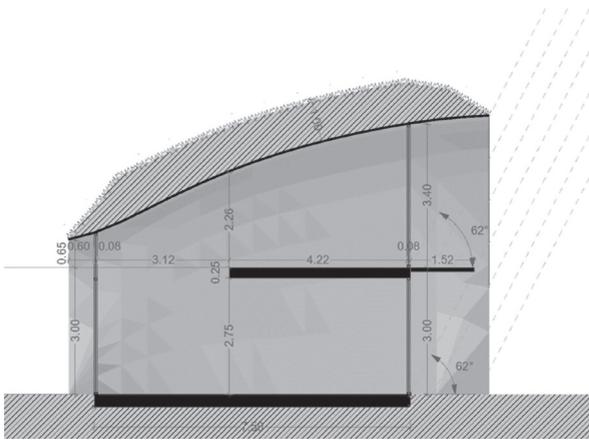
En la **tercera fase** el modelo-prueba fue programado en Designbuilder (2023). A partir de una predefinición de constitución de elementos constructivos y del programa familiar, al modelo fueron aplicados perfiles (construcción, ocupación, iluminación, ventilación) y fue desarrollada una serie de cálculos 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

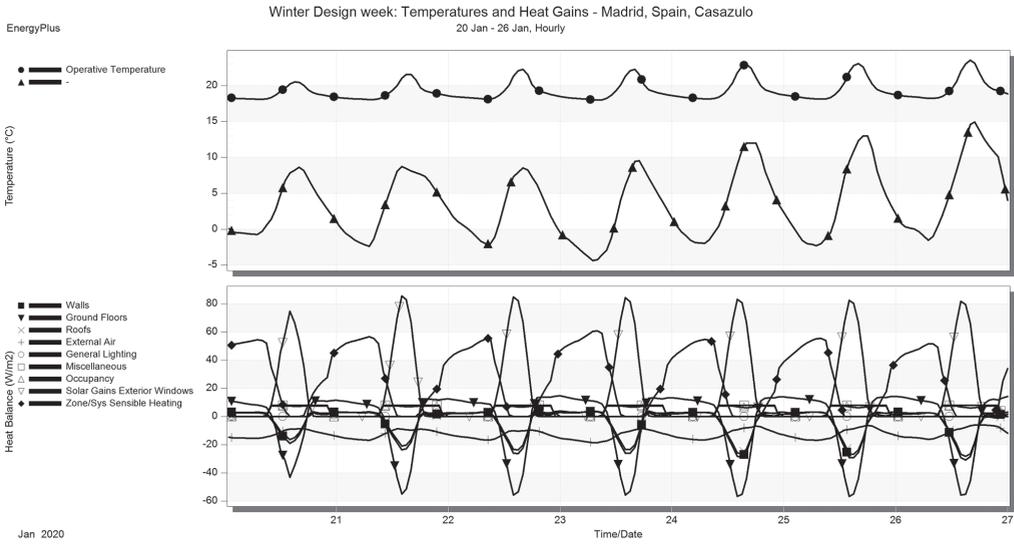
habitacional convencional. Se utilizó el motor de cálculo EnergyPlus v9.4 y la interfaz de usuario Designbuilder v7.2.0.032 (2023).

Resultados Preliminares y Discusión

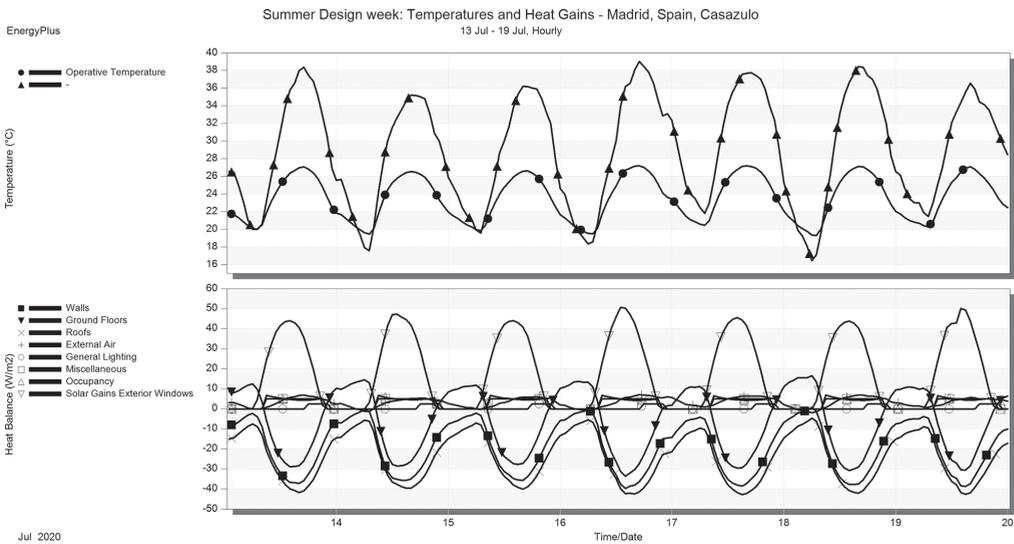
En los **resultados preliminares** del desempeño energético del edificio en la **semana de diseño de invierno**, puede identificarse que el desarrollo de la curva de temperatura operativa interior (media entre la temperatura del aire y la radiante) es casi paralelo a la curva de la temperatura exterior, 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.



7



8

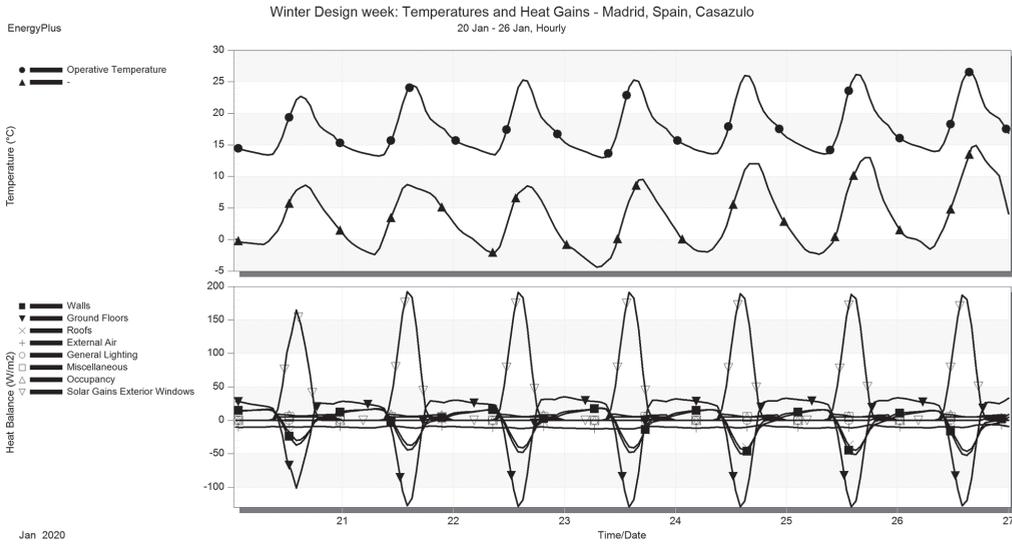
Figura 7. Semana de diseño de invierno (calentamiento) para Madrid (Csa, 3C): temperaturas exterior e interior operativa; ganancias de calor de los elementos constructivos y solares. **Figura 8.** Semana de diseño de verano (refrigeración) para Madrid (Csa, 3C): temperatura exterior e interior operativa; ganancias de calor de los elementos constructivos y solares.

En los **resultados preliminares** del desempeño energético del edificio, en la **semana de diseño de verano**, puede identificarse que el desarrollo de la curva de temperatura operativa interior (media entre la temperatura del aire y la radiante) sigue el mismo ritmo de la curva de la temperatura exterior, pero con una amplitud térmica mucho menor. Además, se verifica que la mayoría de las temperaturas interiores se plantean dentro del rango de “confort” (20-25°C). También en el verano se percibe muy claro el “trabajo” de amortiguación térmica de las paredes, cubierta y forjado, con desempeños individuales muy cercanos, aunque se verifique que el forjado “devuelve” parte del calor absorbido en las horas de menor temperatura interior (y exterior), o sea, durante la noche. Se verifica también que la ventilación constante introduce ganancias (marginales) de calor en el espacio, sin que casi nunca consiga enfriarlo. Lo más importante son las ganancias solares que, aunque los aleros protegen muy bien, asumen una importancia preponderante en el calentamiento del espacio.

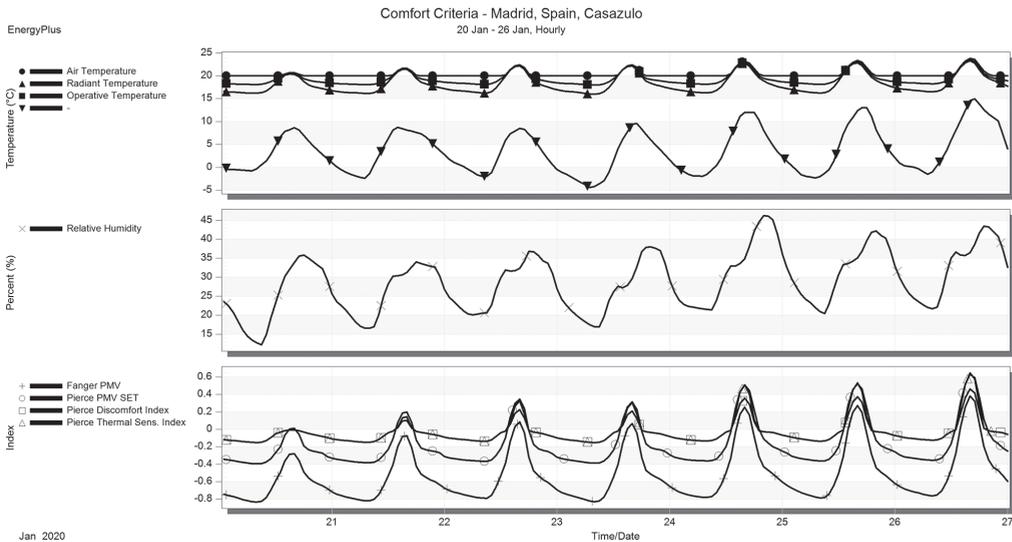
Como medidas pasivas de mejoría, puede sugerirse también el aumento de la inercia térmica interior sobre todo en las paredes y techo, y un menor factor solar en los cristales. O, posiblemente más flexible y eficiente, puede sugerirse la instalación de dispositivos activos de sombreado por el exterior, como cortinas o toldos, que controlan y bajan los picos de ganancias solares, y así obtener una menor amplitud térmica diaria (*Ver Figuras 7 y 8*).

Medidas de Mejoría y Resultados Finales

Como sugerido, fueron planteadas medidas para incrementar la inercia térmica del edificio, por medio de la aplicación en la parte interior de la membrana catenaria (paredes y techo) de una capa adicional de azulejos, o de revoco (cemento-yeso, o tierra-yeso, o doble panel de cemento-yeso) de 3cm de espesor. Otro tipo de elementos podrían ser utilizados, como banquillos o muebles de piedra, hormigón u otro material con elevada densidad y conductividad térmica, o sea, elevada capacidad de almacenaje de calor y retraso térmico. Se podría considerar también la inclusión de una chimenea de piedra para aumentar aún más la inercia térmica dentro del espacio. Una chimenea bien diseñada puede proporcionar una fuente constante de calor durante los meses de invierno, transmitir la frescura del suelo en el verano y eliminar el aire caliente del espacio por el “efecto chimenea” o convección natural. Esta estrategia, combinada con las medidas antes mencionadas, podría resultar en un edificio altamente eficiente y sostenible desde el punto de vista energético. Además, fueron también aplicados dispositivos activos de sombreado por el exterior, del tipo toldo horizontal, programados para estar “activos” durante todo el verano.



9



10

Figura 9. Versión 1- Semana de diseño de invierno (calentamiento) para Madrid (Csa, 3C): temperatura exterior e interior operativa; ganancias de calor de los elementos constructivos y solares. **Figura 10.** Versión 1 - Semana de diseño de invierno (calentamiento) para Madrid (Csa, 3C): temperatura exterior e interior (aire, radiante, operativa); humedad relativa; índices de confort (PPD de Fanger, PMV de Fanger, PMV ET de Pierce, PMV SET de Pierce, Índice de Molestia de Pierce, Índice de Sensación Térmica de Pierce).

A partir de la 2ª serie de cálculos térmicos dinámicos, incluyendo equipo de calefacción con *setpoint* en 20°C, puede verificarse, por comparación con la 1ª serie de cálculos, que los picos máximos de las temperaturas interiores son ligeramente inferiores, hasta 0,6°C. Esto puede significar que la medida de mejora de incremento (muy ligero) de masa e inercia térmica interior **no logra ser muy eficaz**. Además, puede verificarse que ahora, con la incorporación del equipo de calefacción, resulta que las horas con la temperatura previamente debajo del límite teórico de confort son “solucionadas” de forma activa, resultando en demandas de calefacción con máximos diarios de 55W/m². A nivel del confort y basado en los criterios internacionalmente reconocidos de ASHRAE 55 e ISO 7730 para evaluar ambientes interiores, puede inferirse que durante las noches podrá sentirse una sensación de muy ligero enfriamiento y durante las horas de mayor temperatura y radiación solar podrá sentirse una sensación de muy ligero calentamiento (SimScale, 2023).

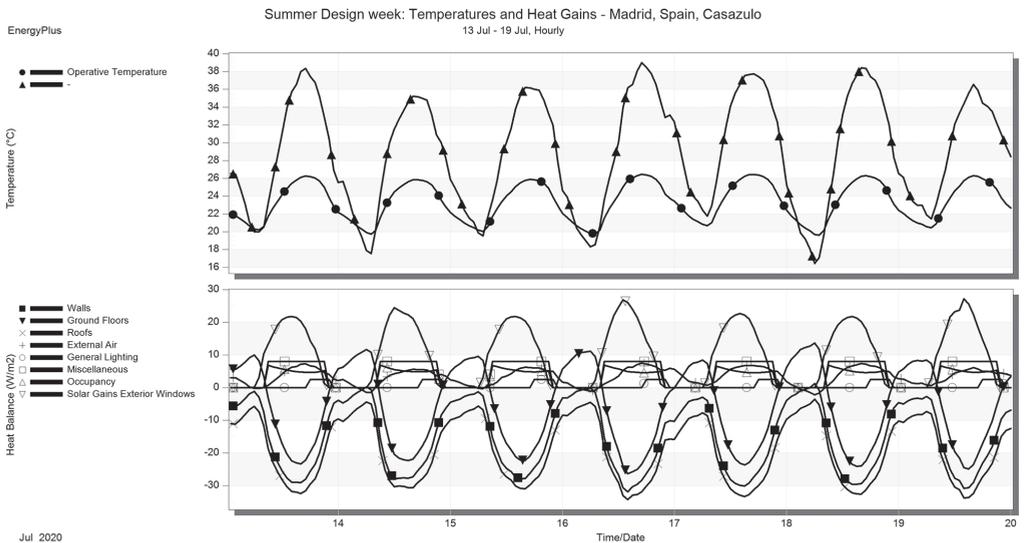


Figura 11. Versión 1- Semana de diseño de verano (refrigeración) para Madrid (Csa, 3C): temperatura exterior e interior operativa; ganancias de calor de los elementos constructivos y solares.

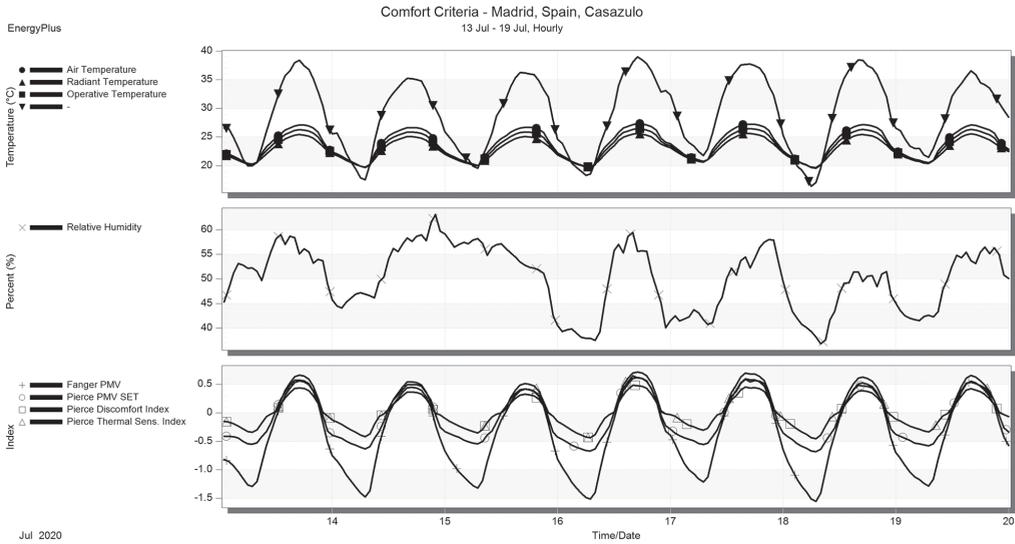


Figura 12. Versión 1- Semana de diseño de verano (refrigeración) para Madrid (Csa, 3C): temperatura exterior e interior (aire, radiante, operativa); humedad relativa; índices de confort (PPD de Fanger, PMV de Fanger, PMV ET de Pierce, PMV SET de Pierce, Índice de Molestia de Pierce, Índice de Sensación Térmica de Pierce).

En la semana de diseño de verano, puede verificarse, por comparación con la 1ª serie de resultados, que la amplitud térmica interior logra en reducirse hasta 2°C, mientras los picos de ganancias solares son reducidos a la mitad. Esto significa que la medida de mejora de sombreado adicional (toldo exterior) resulta muy eficaz. Además, puede verificarse que ahora, el rango de temperatura operativa interior está casi totalmente dentro de la zona de confort. Aun así, según los criterios de ASHRAE 55 e ISO 7730 para evaluar ambientes interiores, puede inferirse que durante las noches podrá sentirse una sensación de muy ligero enfriamiento y durante las horas de mayor temperatura y radiación solar del día, puede sentirse una sensación de muy ligero calentamiento (SimScale, 2023) (Ver Figuras 9, 10, 11 y 12).

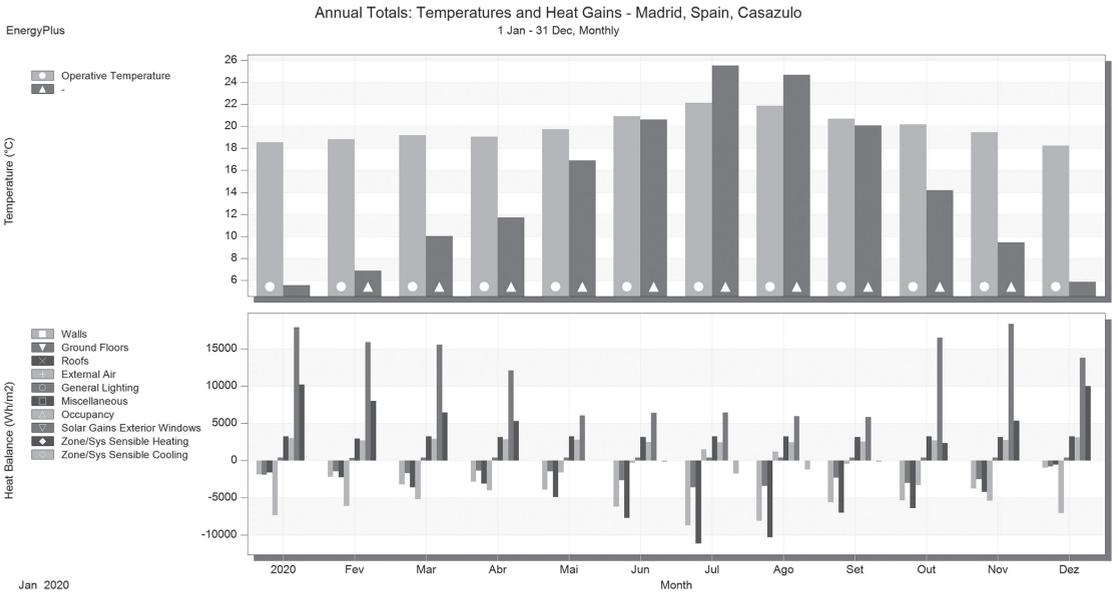


Figura 13. Versión 1- Balance energético anual en Madrid (Csa, 3C): promedios mensuales de temperatura exterior e interior operativa; ganancias de calor de los elementos constructivos y solares; demandas de calefacción y refrigeración.

La evaluación del desempeño energético anual, considerando equipos de HVAC simples, permiten obtener los valores de demandas de calefacción y refrigeración anuales, para set-points de 18°C y 25°C respectivamente. Como se percibe en el balance energético (*Ver Figura 13*), en los meses de invierno la demanda de calefacción es muy importante (promedio de 47,5 Kw/m²), aunque por debajo de las ganancias solares. Al revés, en los meses de verano, la demanda de refrigeración es poco significativa (promedio de 3,35 Kw/m²) una vez que los elementos constructivos hacen su “trabajo” de refrigeración y amortiguación térmica pasiva. Además, en el balance térmico se percibe que el impacto “negativo” de la ventilación es casi tan grande como el impacto “positivo” de la calefacción, lo que significa que, a nivel de valores finales, **una es casi directamente inversa a la otra**. Por eso, se podría sugerir, como nueva medida pasiva de mejoría, la instalación de un sistema de tubo canadiense, que permite el precalentamiento y/o prerrefrigeración del aire de insuflación (aire nuevo) por intercambio de calor con el suelo, y así obtener más **amortiguación térmica**, posiblemente importante, de forma pasiva. Y como se ha mencionado anteriormente, a fin de atenuar las pérdidas de calor durante las noches, se puede probar el “upgrade” de los acristalamientos, a través del uso de vidrios **bajo emisivos** con un U de 1,68 W/m².k, y un factor solar de 0,42.

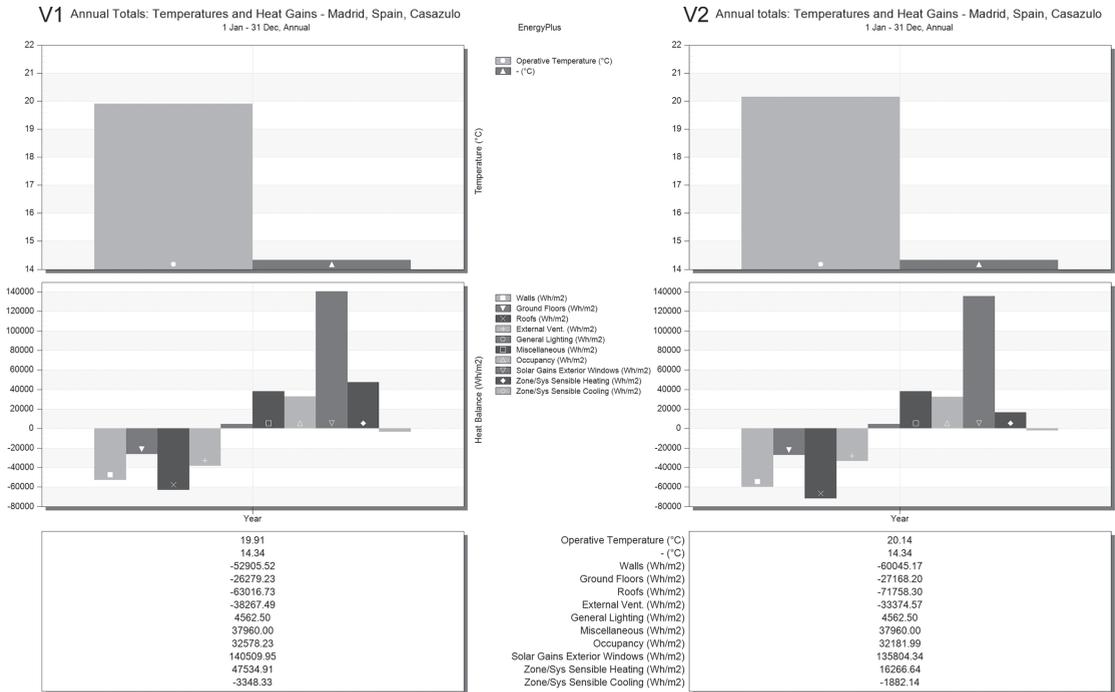


Figura 14. Comparación del balance energético anual en Madrid (Csa, 3C) de las versiones 1 y 2: promedios anuales de temperatura exterior e interior operativa; ganancias de calor de los elementos constructivos y solares; demandas de calefacción y refrigeración.

La comparación de la evaluación del desempeño energético anual de las versiones 1 y 2 (Ver Figura 14) permite verificar que las **demandas de climatización se han reducido a más de la mitad**, entre versiones, derivado de la **eficacia de la aplicación del conjunto de las medidas de mejora**.

Frente al valor calculado de demanda anual de refrigeración sensible, de solo 1,9 Kw/m2, puede considerarse que no es necesaria la instalación de equipos activos de refrigeración (p.ej. aire acondicionado). Y frente al valor calculado de demanda anual de calefacción de 16,3 Kw/m2, puede considerarse que esa demanda podría satisfacerse con equipos de biomasa, del tipo “estufa de leña” de baja potencia.

Al final, se puede concluir que, si por un lado hay que tener en cuenta que se trata de un estudio preliminar, con el objetivo de ganar sensibilidad, y con una geometría de perfiles simplificados, y así hay que leer los **resultados preliminares con precaución**, y permitiendo un amplio margen de error, por otro lado, según esos mismos resultados preliminares, para el sistema optimizado bajo el clima estudiado, son presentados valores de desempeño

energético (teórico) muy positivos, lo que puede permitir extrapolar que el sistema y edificio propuesto puede alcanzar con cierta facilidad (teóricamente) el marco de ZEB en la gran parte del territorio de España continental y/u otras ubicaciones con clima semejante, con altos índices de confort térmico a lo largo de todo el año.

Referencias Bibliográficas

- ASHRAE. (2020). *ANSI/ASHRAE Addendum a to ANSI/ASHRAE Standard 169-2020 - Climatic Data for Building Design Standards*. Recuperado de https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/169_2020_a_20211029.pdf.
- Berto, R. (2005). Exposure to restorative environments helps restore attentional capacity. *Journal of Environmental Psychology*, 25, pp. 249-259.
- Chawla, L., Keena, K., Pevec, I., & Stanley, E. (2014). Green schoolyards as havens from stress and resources for resilience in childhood and adolescence. *Health & Place*, 28, pp. 1-13. doi: 10.1016/j.healthplace.2014.03.001.
- Chayaamor-Heil, N. (2023). From Bioinspiration to Biomimicry in Architecture: Opportunities and Challenges. *Encyclopedia*, 3(1), pp. 202-223.
- Cillis, G. (2020). Pietragalla: rural heritage between architecture and archaeology. *Medium*. Recuperado de <https://giucillis.medium.com/pietragalla-rural-heritage-between-architecture-and-archaeology-86ab04486654>.
- Darwin, C. (1859). *El origen de las especies*. Londres: John Murray.
- DesignBuilder Software Ltd. (2023). DesignBuilder SBEM and DSM Approved Versions. *DesignBuilder*. Recuperado de <https://designbuilder.co.uk/software/designbuilder-sbem-and-dsm-approved-versions/>.
- European Committee for Standardization (CEN/TC 156) - Ventilation for buildings. (2019). *Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics* (EN 16798-1:2019).
- Faber Taylor, A., Kuo, F., & Sullivan, W. (2002). Views of nature and self-discipline: evidence from inner city children. *Journal of Environmental Psychology*, 22/1-2, pp. 49-63. Elsevier BV. doi: 10.1006/jevp.2001.0241.
- Godbay, G. (2009). Outdoor recreation, health, and wellness: Understanding and enhancing the relationship. *Resources for the Future*. Recuperado de <https://media.rff.org/documents/RFF-DP-09-21.pdf>.
- Ilieva, L., Ursano, I., Traista, L., Hoffmann, B., & Dahy, H. (2022). Biomimicry as a Sustainable Design Methodology—Introducing the ‘Biomimicry for Sustainability’ Framework. *Biomimetics*, 7(2), p. 37.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Zeitschrift*, 15, pp. 259-263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.

- Krichmar, J. L., Severa, W., Khan, M. S., & Olds, J. L. (2019). Making BREAD: Biomimetic Strategies for Artificial Intelligence Now and in the Future. *Frontiers in Neuroscience*. Recuperado de <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnins.2019.00666/full>.
- Lobo, L. A. C., & Rieth, C. E. (2021). Saúde mental e Covid-19: uma revisão integrativa da literatura. *Estudos de Psicologia*, 38, e210011. <https://doi.org/10.1590/1982-0275202138e210011>.
- Nedovic, S., & Morrissey, A. (2013). Calm Active and Focused: Children's Responses to an Organic Outdoor Learning Environment. *Learning Environments Research*, 16 (2), 2, pp. 81-95.
- Palumbo, J. (2022). ¿Vivirías en una cueva? Estos arquitectos creen que deberíamos. Recuperado de <https://www.cnn.com/style/article/architects-sustainable-cave-living>.
- Portalatin-Mendez, E., & Doe, J. (2019). Deep Learning with Biomimicry. *Journal of Design and Science*. Recuperado de <https://jods.mitpress.mit.edu/pub/d8an1bja>.
- Schmidt, J. H. (1934). L'expédition de Ctésiphon en 1931-1932. Syria. *Archéologie, Art et histoire*, 15(1), pp. 1-23.
- SimScale. (2023). *What is PMV & PPD?* SimScale Blog. Recuperado de <https://www.simscale.com/blog/what-is-pmv-ppd/>
- Smith, M. W. (2001). *Analysis of the thermal performance of Tierra I—a low-energy high-mass residence*. National Renewable Energy Laboratory.
- The Constructor. (2021). *23 Types of Concrete Used in Construction and their Applications*. Recuperado de <https://theconstructor.org/concrete/types-concrete-applications/19779/>.
- Ulrich, R. S. (1984). View through a window may influence recovery from surgery. *Science*, 224 (4647), pp. 420-421. doi: 10.1126/science.6143402.
- Verderber, S. (1986). Dimensions Of person-window Transactions in the hospital environment. *Environment and Behavior*, 18 (4), pp. 450-466.
- Verderber, S., & Reuman, D. (1987). Windows, views, and health status in hospital therapeutic environments. *Journal of Architectural and Planning Research*, pp. 120-133.
- Villaga Calce S.P.A. (2009). *Process for production of natural hydraulic lime*. Recuperado de <https://patents.google.com/patent/WO2009098727A2/en>.
- Wright, G. R. H. (2009). *Ancient building technology*, vol. 3. Leiden: Koninklijke Brill NV.
- Yuan, P. F. (2023). Toward a generative AI-augmented design era. *ARIN*, 2(16). <https://doi.org/10.1007/s44223-023-00038-9>.

Abstract: Bio-inspired architecture, supported by Artificial Intelligence (AI), generates designs that integrate with the natural and built environment, considering human needs, cultural values and sustainable development goals. The impact of living spaces on our well-being is analysed, using environmental and developmental psychology. Data have been obtained from energy performance assessments of semi-buried biomorphic structures, analogous to earthen construction (Smith, 2001). Calculations were performed for the typical climate of Madrid, using dynamic energy simulations. The heat balance without and with air conditioning was addressed in the heating and cooling design weeks for base-

line and upgraded versions. Preliminary results allow inferring the effectiveness of this building system in maintaining the building in adaptive thermal comfort throughout the year, for climatic locations in Spain, with heating demands below 18 Kwh/m².a, and no relevant cooling demands. The study pointed out that the use of passive bioclimatic strategies may be sufficient for the adaptation of the system to other locations with more demanding climates, respecting the figures of the NZEB standard or the ZEB norm. In conclusion, the bio-inspired research project presented here is an evolutionary process that requires continuous interdisciplinary collaboration and critical reflection. AI-guided applications of biomimetic strategies are intended to further generate innovative and sustainable solutions to current challenges of society and its interaction with the environment.

Keywords: Biomimetic design - Environmental psychology - Artificial and natural intelligence - Symbiotic adaptation - Dynamic energy simulations - Adaptive thermal comfort

Resumo: A arquitetura de inspiração biológica, apoiada pela Inteligência Artificial (IA), gera projetos que se integram ao ambiente natural e construído, considerando as necessidades humanas, os valores culturais e as metas de desenvolvimento sustentável. O impacto dos espaços de convivência em nosso bem-estar é analisado com base na psicologia ambiental e do desenvolvimento. Foram obtidos dados de avaliações de desempenho energético de estruturas biomórficas semi-enterradas, análogas à construção em terra (Smith, 2001). Os cálculos foram realizados para o clima típico de Madri, usando simulações dinâmicas de energia. O balanço de calor sem e com ar-condicionado foi abordado nas semanas de projeto de aquecimento e resfriamento para as versões de base e atualizadas. Os resultados preliminares permitem inferir a eficácia desse sistema de construção para manter o edifício em conforto térmico adaptável durante todo o ano, para locais climáticos na Espanha, com demandas de aquecimento abaixo de 18 Kwh/m².a e sem demandas de resfriamento relevantes. O estudo apontou que o uso de estratégias bioclimáticas passivas pode ser suficiente para a adaptação do sistema a outros locais com climas mais exigentes, respeitando os valores da norma NZEB ou da norma ZEB. Concluindo, o projeto de pesquisa bioinspirado apresentado aqui é um processo evolutivo que exige colaboração interdisciplinar contínua e reflexão crítica. As aplicações orientadas por IA de estratégias biomiméticas têm o objetivo de gerar soluções inovadoras e sustentáveis para os desafios atuais da sociedade e sua interação com o meio ambiente.

Palavras-chave: Design biomimético - Psicologia ambiental - Inteligência artificial e natural - Adaptação simbiótica - Simulações dinâmicas de energia - Conforto térmico adaptativo