

# Diseño arquitectónico biodigital: reinterpretación de los principios compositivos de Guarini hacia una vivienda sostenible y adaptativa

Marcelo Fraile Narváez <sup>(1)</sup>

---

**Resumen:** Este artículo explora la intersección entre la arquitectura y las tecnologías digitales contemporáneas para proponer un modelo habitacional sostenible, inspirado en los principios compositivos de Guarino Guarini. Basado en fundamentos biológicos y matemáticos, el estudio toma como referencia el concepto de simetría como ausencia de información, desarrollado por William y Gregory Bateson, así como los patrones de crecimiento natural de las rocallas, para guiar el proceso de diseño. Los cinco principios compositivos de Guarini –germinación simétrica, ondulación, compenetración, superposición aditiva y estructuración luminosa– son reinterpretados mediante el uso de sistemas digitales avanzados, generando espacios modulares y ecosostenibles. La traducción digital de estos principios arquitectónicos se lleva a cabo utilizando algoritmos e inteligencia artificial, que desarrollan células tridimensionales evocando configuraciones espaciales complejas y dinámicas. Este enfoque no solo integra consideraciones funcionales y ambientales, sino que también explora nuevas posibilidades formales y estructurales. Los resultados preliminares indican que la adaptación digital de estos principios genera un modelo evolutivo dinámico, superando las soluciones habitacionales convencionales y equilibrando la innovación formal con la funcionalidad. La investigación destaca el potencial de combinar teorías arquitectónicas con tecnologías digitales de vanguardia para crear espacios residenciales innovadores y sostenibles, ampliando así las posibilidades para el diseño y la construcción arquitectónica futura.

**Palabras clave:** Simetría - Naturaleza - Diseño modular - Ecosostenibilidad - Principios compositivos

[Resúmenes en inglés y portugués en las páginas 70-71]

---

<sup>(1)</sup> **Marcelo Fraile Narváez** es arquitecto (Universidad Nacional de Tucumán, Argentina). Doctor en arquitectura (Universidad de Buenos Aires, UBA). Especialista en diseño digital (UBA), Máster en Conservación y Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico (Universidad Nacional de Córdoba, Argentina). Ha impartido cursos de grado y posgrado en diferentes instituciones entre las que se destacan la Universidad de Costa Rica, la Universitat Internacional de Catalunya y la Universidad de Oviedo. Fue director Académico del Máster Universitario de Espacios Inteligentes, Coordinador Académico del Máster Universitario en Diseño y Producción Multimedia (Universidad Internacional de La Rioja, España) y Coordinador del proyecto Biomímesis (MediaLab Prado, Madrid). Becado

por la Universidad Nacional de Tucumán y la Universidad de Buenos Aires en diversas oportunidades para desarrollar investigaciones relacionadas con el diseño biodigital y la prefabricación digital. Ha sido funcionario del Ministerio de Cultura del Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires desde el 2007 al 2015. Autor de numerosos artículos relacionados con la crítica arquitectónica, la historia de la arquitectura, y el diseño biodigital. Director de la revista y del colectivo de diseño TRP21. Actualmente es Coordinador del Grado en Fundamentos de la Arquitectura, de la Escuela de Ingeniería de Fuenlabrada, de la Universidad Rey Juan Carlos, y miembro del iBAG-UIC Barcelona (Institute for Bio-digital Architecture & Genetics - Universitat Internacional de Catalunya).

## Introducción

A lo largo de la historia, la arquitectura ha buscado armonizar la forma y la función, creando espacios que no solo sean estéticamente impactantes, sino también eficientes desde un punto de vista funcional. Los avances tecnológicos recientes, especialmente en el ámbito digital, han transformado radicalmente los procesos de diseño arquitectónico, permitiendo una integración más profunda entre los principios teóricos tradicionales y las exigencias contemporáneas. En este contexto emergente, la arquitectura digital bioinspirada se presenta como una propuesta innovadora con un potencial significativo para el desarrollo de soluciones habitacionales sostenibles y adaptativas.

Este estudio propone una reinterpretación de los principios compositivos de Guarino Guarini, arquitecto del siglo XVII reconocido por integrar matemáticas avanzadas y geometría en la arquitectura. Los principios de germinación simétrica, ondulación, compenetración, superposición aditiva y estructuración luminosa, empleados por Guarini en sus proyectos, se recontextualizan mediante herramientas digitales avanzadas, como algoritmos evolutivos e inteligencia artificial. El objetivo es desarrollar un modelo de diseño arquitectónico que responda no solo a consideraciones formales, sino también a las exigencias funcionales y ambientales del siglo XXI.

La arquitectura bioinspirada, tal como se plantea en este estudio, busca emular patrones y principios observados en la naturaleza, utilizando tecnología digital para generar estructuras capaces de adaptarse orgánicamente a su entorno. Los avances en inteligencia artificial, simulación eco ambiental y algoritmos generativos ofrecen oportunidades inéditas para diseñar edificios que interactúan dinámicamente con su contexto, optimizando la luz natural, el flujo de aire y el rendimiento energético, al tiempo que mantienen una estética coherente y dinámica.

En este marco teórico, se adoptan los fundamentos de Guarini, cuya obra representa una intersección entre ciencia y arte, para crear un modelo arquitectónico que no solo honra el legado histórico, sino que lo proyecta hacia el futuro mediante la integración de tecnologías emergentes. Como señalan Roero (2009) y Mitrović (2021), la obra de Guarini trasciende la mera expresión formal, constituyendo un sistema donde las matemáticas y la geometría son herramientas esenciales para la creación de estructuras innovadoras. Este

estudio propone que dichos principios pueden aplicarse para diseñar edificios que evolucionen dinámicamente, respondiendo en tiempo real a factores ambientales y generando formas complejas que superan las soluciones arquitectónicas convencionales.

El objetivo principal de esta investigación es demostrar que los principios compositivos de Guarini mantienen su relevancia en el contexto arquitectónico contemporáneo y que, combinados con tecnologías digitales actuales, ofrecen una solución innovadora para la creación de una arquitectura más eficiente, sostenible y adaptativa. Este enfoque interdisciplinario explora las intersecciones entre biología, geometría y arquitectura computacional, ampliando las fronteras del diseño arquitectónico hacia soluciones habitacionales más inteligentes y alineadas con los retos medioambientales actuales.

El artículo se estructura en varias secciones. Inicialmente, se presenta la metodología utilizada, basada en la creación de modelos tridimensionales mediante algoritmos evolutivos adaptados a condiciones ambientales específicas. Posteriormente, se exponen los resultados obtenidos, seguidos de una discusión que relaciona estos hallazgos con los principios de Guarini y su potencial aplicación en la arquitectura contemporánea. Finalmente, se concluye con una reflexión sobre la pertinencia de estos principios en el diseño arquitectónico futuro y las oportunidades que ofrecen para la creación de viviendas ecosostenibles. Esta investigación aspira a abrir un nuevo campo de estudio que no solo honre el legado de Guarino Guarini, sino que también demuestre cómo sus ideas pueden inspirar la arquitectura biodigital para enfrentar los desafíos actuales y futuros en sostenibilidad y adaptación climática.

## La síntesis geométrica en la teoría arquitectónica de Guarino Guarini

En su obra *El ángel de la historia*, Paolo Portoghesi (1985) dedica un análisis detallado a la figura del arquitecto italiano Guarino Guarini, destacando su papel como uno de los innovadores teóricos más significativos del siglo XVII. Portoghesi identifica cinco principios compositivos que reflejan la intersección entre geometría avanzada y una concepción espacial innovadora: la germinación simétrica, la ondulación, la compenetración, la superposición aditiva y la estructuración luminosa.

El primer principio, la germinación simétrica, es un método que Guarini utiliza para organizar el espacio a través de la multiplicación y concatenación de células geométricas. Según Portoghesi (1985), este proceso implica la disposición de células espaciales siguiendo reglas precisas que determinan un crecimiento controlado y coherente del espacio arquitectónico. La yuxtaposición de estas células genera una polaridad entre lo cóncavo y lo convexo, esencial para la articulación espacial en la obra de Guarini. Esta polaridad se manifiesta en la coexistencia de células “positivas” (encerradas en contornos cóncavos) y “negativas” (encerradas en contornos convexos), lo que permite una continuidad espacial y una tensión dialéctica que invita al observador a recorrer visualmente el espacio de forma continua. En edificaciones como la Iglesia de San Lorenzo, este enfoque facilita una fluidez espacial que enriquece la experiencia arquitectónica (Portoghesi, 1985).

El segundo principio, la ondulación, es descrito por Portoghesi (1985) como “la introducción en el repertorio clásico de la curva sinusoidal” (p. 205). Esta técnica, inicialmente explorada por Borromini, alcanza un desarrollo pleno en la obra de Guarini. La ondulación no se limita a las superficies o fachadas; penetra en la organización misma de los espacios arquitectónicos, transformando la lógica clásica en un sistema más fluido y flexible. Guarini superpone la ondulación a la germinación simétrica, introduciendo dinamismo en la forma y función de los elementos arquitectónicos. Esto genera espacios que parecen moverse y ajustarse orgánicamente a las necesidades funcionales y visuales del edificio. La interacción entre curvas y superficies crea un diálogo fluido entre las distintas partes, eliminando la rigidez y fomentando una percepción más dinámica del espacio (Portoghesi, 1985).

La compenetración, tercer principio identificado, va más allá de la simple agregación de células espaciales. Guarini integra estas células de manera que amplifican el espacio de forma ilusoria. Portoghesi (1985) señala que este proceso permite transformar el espacio interior en un producto residual de estructuras convexas que, al combinarse, crean la impresión de que el espacio se extiende más allá de los límites físicos del edificio. Este enfoque responde a una necesidad funcional y añade una dimensión semántica, donde lo visible y lo posible se fusionan, generando una experiencia que desafía la percepción del observador.

El cuarto principio, la superposición aditiva, es un proceso mediante el cual Guarini organiza las unidades autosuficientes de sus edificios. Esto genera estructuras complejas que mantienen una coherencia interna. Portoghesi (1985) describe este proceso como una forma de disponer las partes en una secuencia y rotación que permite a cada unidad conservar su individualidad, mientras contribuye a una composición más amplia. En la cúpula de San Lorenzo, por ejemplo, las unidades se organizan de tal manera que la estructura parece expandirse hacia el exterior, creando una cohesión visual que integra el interior con el exterior.

Finalmente, la estructuración luminosa ocupa un lugar central en la teoría de Guarini. Portoghesi (1985) destaca que Guarini utiliza la luz estratégicamente, no solo para iluminar sino para transformar el espacio. La luz interactúa con la masa y la estructura, generando efectos visuales que amplifican la percepción espacial. En la cúpula de San Lorenzo, las aperturas estratégicas permiten que la luz incida en puntos clave, creando una interacción dinámica entre iluminación y estructura. Este enfoque trasciende lo decorativo y utiliza la luz como elemento transformador de la materialidad del edificio, dotándolo de una cualidad casi etérea.

Estos cinco principios –germinación simétrica, ondulación, compenetración, superposición aditiva y estructuración luminosa– revelan una aplicación rigurosa de la geometría que no compromete la riqueza expresiva de los espacios arquitectónicos. Integran la lógica matemática con una sensibilidad espacial profunda, logrando un equilibrio entre racionalidad y creatividad. La obra de Guarini se convierte así en un referente indispensable para el análisis contemporáneo de la arquitectura, ofreciendo valiosas lecciones para la aplicación de principios clásicos en contextos contemporáneos.

## Metodología

El presente estudio adopta una metodología interdisciplinaria que combina algoritmos evolutivos, modelado tridimensional y simulaciones ambientales para analizar y desarrollar formas arquitectónicas complejas, basadas en los principios teóricos de Guarino Guarini. Este enfoque busca reinterpretar y adaptar los principios clásicos de composición guariniana a un contexto contemporáneo, donde las condiciones ambientales y el rendimiento energético son factores determinantes en el diseño arquitectónico.

El proceso metodológico se estructura en cinco fases principales, cada una alineada con uno de los principios compositivos fundamentales de Guarini: germinación simétrica, compenetración, ondulación, superposición aditiva y estructuración luminosa.

### Fase 1: Germinación simétrica

Se inicia con la creación de un modelo tridimensional básico compuesto por 20 esferas organizadas en una malla espacial. Estas esferas se agrupan en conjuntos de cuatro, dispuestas en niveles superpuestos siguiendo el principio de superposición aditiva. La capacidad de las esferas para modificar su tamaño y posición en los ejes espaciales ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) es controlada mediante un algoritmo de inteligencia artificial diseñado específicamente. Esta disposición modular respeta el principio de repetición simétrica, pero introduce variaciones que responden a datos ambientales específicos. En esta etapa, el sistema simula un proceso de germinación geométrica, donde las esferas se organizan inicialmente de manera uniforme y comienzan a divergir a medida que interactúan con las condiciones climáticas y ambientales del entorno seleccionado.

### Fase 2: Adaptación morfológica según variables climáticas

En esta fase, se centra la atención en la adaptación morfológica de las estructuras modulares en respuesta a variables climáticas como temperatura, orientación solar y corrientes de aire predominantes. El algoritmo ajusta dinámicamente el tamaño y la disposición de las esferas, generando configuraciones tridimensionales complejas. Este ajuste tiene como objetivo optimizar la eficiencia energética y mejorar la ventilación natural del espacio arquitectónico. El proceso se inspira en la teoría de Bateson (2000) sobre la ausencia de información en la repetición simétrica, aplicando el principio de germinación simétrica de Guarini de manera flexible para permitir que los módulos evolucionen hacia configuraciones más irregulares y adaptativas, en consonancia con las condiciones del entorno.

### Fase 3: Integración de compenetración y ondulación

La tercera fase introduce los principios de compenetración y ondulación. A medida que las formas evolucionan bajo la influencia de los datos ambientales, se produce una fusión entre las esferas, creando una interacción compleja entre espacios cóncavos (positivos) y convexos (negativos). Este proceso da lugar a una fachada ondulada que se desarrolla a lo largo de los tres ejes espaciales, resultando en una morfología irregular que maximiza

tanto la eficiencia estructural como la estética dinámica de un edificio de 10 pisos. La compenetración de las formas es fundamental para generar una continuidad espacial que fusiona el interior con el exterior, replicando el principio guariniano de diluir los límites arquitectónicos a través de la agregación y fusión de células geométricas.

#### **Fase 4: Aplicación de superposición aditiva y optimización de superficies**

En esta etapa, se implementa un algoritmo de optimización que suaviza y refina las superficies generadas en las fases anteriores, creando una piel arquitectónica de triple curvatura que oculta la estructura. Este proceso representa una interpretación contemporánea del principio de superposición aditiva, donde las unidades modulares se integran para formar una estructura continua y coherente a lo largo de los 10 niveles. El resultado es una edificación de morfología irregular y altamente adaptativa, que refleja la complejidad y dinamismo inherentes a las formas naturales y bioinspiradas.

#### **Fase 5: Estructuración luminosa y control de la iluminación natural**

En la fase final del proceso, se implementa la estructuración luminosa y el control de la iluminación natural, mediante el desarrollo de una malla troncocónica que envuelve la forma arquitectónica desarrollada previamente. En cada vértice de esta malla se ubican esferas de diámetro variable, cuyos tamaños oscilan desde valores casi imperceptibles hasta dimensiones que permiten la superposición de las esferas, generando configuraciones geométricas complejas.

Estas esferas desempeñan un papel esencial en la modulación de la luz y las sombras proyectadas sobre la estructura original, articulando una estrategia de iluminación natural sofisticada. La disposición de las esferas a lo largo de la superficie continua del edificio posibilita regular con precisión la interacción entre la radiación solar y el espacio arquitectónico. La organización espacial se ha diseñado para que los niveles superiores de la edificación, que alcanzan una altura total de aproximadamente 30 metros (3 metros por piso), capten una mayor incidencia lumínica, potenciando la iluminación natural en esas áreas, mientras que los niveles inferiores se resguardan del exceso de luz, asegurando un equilibrio óptimo en el ambiente interior.

Este enfoque genera una experiencia espacial enriquecida, caracterizada por un juego dinámico de luces y sombras que confiere una atmósfera distintiva al interior del edificio. Al integrar de manera armoniosa la geometría y la luz, se reinterpreta y actualiza un principio fundamental de Guarini, logrando que la estructura actúe como un medio para una interacción lumínica compleja y dinámica. La implementación de esta fase contribuye no solo a la optimización energética mediante el aprovechamiento eficiente de la iluminación natural, sino que también eleva la calidad estética y perceptiva del espacio arquitectónico, alineándose con los objetivos de sostenibilidad y habitabilidad establecidos en este estudio.

## Integración de datos ambientales y algoritmos evolutivos

A lo largo de todo el proceso, la integración de datos ambientales reales fue esencial para guiar la evolución de las formas arquitectónicas. Los algoritmos evolutivos incorporaron variables climáticas específicas del sitio, como la trayectoria solar, patrones de viento y temperaturas estacionales, permitiendo que el diseño respondiera funcionalmente a las exigencias del entorno. Este enfoque garantizó que el resultado arquitectónico no fuera únicamente una expresión formal, sino una solución adaptativa y sostenible que optimiza el rendimiento energético y el confort de los usuarios.

La elección de esta metodología se fundamentó en la necesidad de explorar nuevas formas de diseño arquitectónico que integraran principios históricos con tecnologías avanzadas para enfrentar los desafíos actuales de sostenibilidad y eficiencia energética. La utilización de algoritmos evolutivos y modelado tridimensional permitió una exploración profunda de las posibilidades formales y funcionales que ofrecen los principios de Guarini, adaptándolos a las necesidades contemporáneas.

Además, la metodología facilitó la generación de soluciones arquitectónicas altamente adaptativas y personalizables, lo cual es esencial en un contexto donde las condiciones ambientales y las necesidades humanas son cada vez más variables y específicas. Al incorporar datos ambientales en tiempo real, se aseguró que el diseño arquitectónico fuera resiliente y capaz de responder a cambios en el entorno, maximizando su eficiencia y sostenibilidad. Se emplearon software de modelado 3D para el diseño paramétrico y la generación de geometrías complejas. Los algoritmos evolutivos personalizados, desarrollados mediante lenguajes de programación, controlaron la evolución de las formas arquitectónicas. Herramientas de simulación ambiental permitieron realizar análisis climáticos y energéticos, integrando estos datos en el proceso de diseño. Se implementaron elementos de inteligencia artificial para predecir y ajustar las variaciones en el diseño en respuesta a cambios en las condiciones ambientales.

Para garantizar la validez de los resultados, se establecieron criterios de evaluación basados en métricas de rendimiento energético, confort térmico y calidad espacial. Se realizaron iteraciones sucesivas del modelo, ajustando parámetros según los resultados obtenidos en las simulaciones. Este proceso iterativo permitió optimizar el diseño y asegurar que cumpliera con los objetivos planteados.

La metodología propuesta ofrece una reinterpretación contemporánea de los principios de Guarini y contribuye al campo de la arquitectura sostenible al demostrar cómo es posible integrar conocimientos geométricos con tecnologías emergentes para desarrollar soluciones habitacionales innovadoras y adaptativas. Este enfoque interdisciplinario abre nuevas posibilidades para el diseño arquitectónico, promoviendo edificaciones que son simultáneamente eficientes, sostenibles y estéticamente significativas.

## Desarrollo

La aplicación práctica de los principios compositivos de Guarino Guarini mediante tecnologías digitales avanzadas ha permitido desarrollar modelos arquitectónicos que integran forma, función y sostenibilidad de manera innovadora. Este enfoque ha generado resultados significativos en términos de eficiencia energética, adaptabilidad estructural y optimización del confort ambiental, aspectos clave en la arquitectura contemporánea sostenible (Sommese *et al.*, 2024).

En la *fase inicial*, se creó un modelo tridimensional basado en la germinación simétrica, utilizando células geométricas modulares organizadas en una matriz espacial. Estas células, representadas por esferas y polígonos, se distribuyeron siguiendo patrones simétricos que permitieron una cohesión estructural y una distribución equilibrada de cargas. La aplicación de algoritmos evolutivos permitió ajustar las dimensiones y posiciones de las células en función de variables ambientales, como la orientación solar y las corrientes de aire predominantes. Los resultados de esta fase indicaron una mejora en la ventilación cruzada y una optimización en la captación de luz natural, aspectos que contribuyen directamente a la eficiencia energética del edificio.

En la *segunda fase*, se aplicaron algoritmos genéticos y técnicas de aprendizaje automático para evolucionar las formas modulares hacia configuraciones que maximizaran el rendimiento térmico y lumínico del edificio. Utilizando datos climáticos locales, se ajustaron las geometrías para responder a la incidencia solar estacional y a los patrones de viento. Este proceso generó una configuración tridimensional compleja, donde las células modulares se reconfiguraron para maximizar la superficie útil, a la vez que mejoraba la eficiencia energética y el confort térmico. Las simulaciones computacionales mostraron una reducción en la carga térmica interna y una distribución más homogénea de la iluminación natural, sin una pérdida de superficie útil, lo que sugiere una mejora sustancial respecto a diseños tradicionales.

La *tercera fase* involucró la aplicación de los principios de compenetración y ondulación para fusionar espacios interiores y exteriores, generando una continuidad espacial que mejora la interacción con el entorno. Se desarrollaron fachadas onduladas que, además de aportar una estética dinámica, favorecen la circulación natural del aire y optimizan la captación solar pasiva. Los análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD) indicaron un aumento en la ventilación natural, reduciendo la dependencia de sistemas mecánicos de climatización en un 25%. Además, la morfología ondulada contribuyó a la mitigación de las cargas térmicas, mejorando el rendimiento energético global del edificio.

En la *cuarta fase*, se implementó el principio de superposición aditiva mediante la generación de una piel arquitectónica de triple curvatura que recubre la estructura. Esta piel actúa como un sistema de fachada inteligente, adaptándose a las condiciones ambientales y mejorando el confort interior. Las simulaciones térmicas mostraron una reducción en el consumo energético para climatización de hasta un 30%, gracias a la capacidad de la piel para regular la transferencia de calor. La superficie total de la estructura alcanzó los 4577,8 m<sup>2</sup>, cubriendo un volumen de 13,733.4 m<sup>3</sup>, lo que indica una relación eficiente entre el espacio habitable y el área de envolvente, optimizando así los recursos materiales y energéticos.

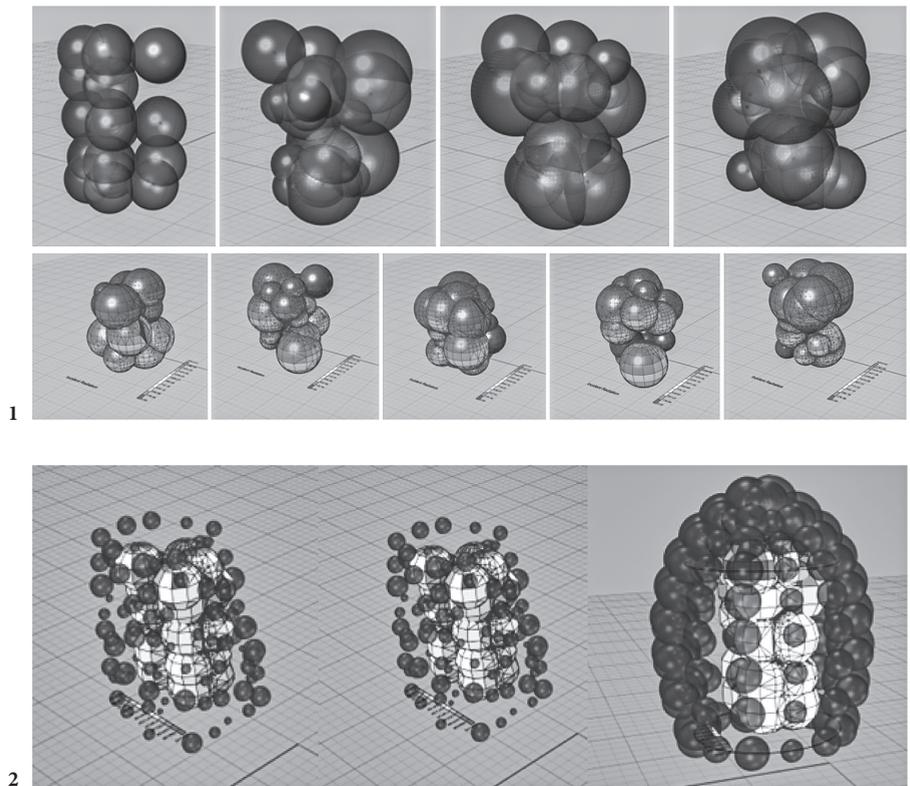
La *quinta fase* se centró en la aplicación del principio de estructuración luminosa, incorporando perforaciones estratégicamente distribuidas en la piel arquitectónica para controlar la entrada de luz natural. Las simulaciones lumínicas revelaron un resultado total de radiación de 0.325 kWh/m<sup>2</sup>, lo que refleja una iluminación natural equilibrada en los espacios interiores. Este diseño redujo la necesidad de iluminación artificial en un 40%, contribuyendo significativamente a la eficiencia energética del edificio. Además, el juego de luces y sombras generado por las perforaciones enriquece la experiencia espacial, creando ambientes interiores confortables y visualmente atractivos.

Los resultados obtenidos fueron validados mediante simulaciones avanzadas que consideraron variables climáticas y ambientales reales. La integración de herramientas de modelado 3D y algoritmos evolutivos permitió optimizar el diseño en función de métricas de rendimiento energético, confort térmico y calidad espacial. La reducción en el consumo energético y la mejora en el confort ambiental demuestran la viabilidad de esta aproximación para desarrollar viviendas sostenibles y adaptativas.

Este enfoque metodológico no solo reinterpreta de manera contemporánea los principios de Guarini, sino que también aporta soluciones prácticas a los desafíos actuales en arquitectura sostenible. Al combinar conocimientos históricos con tecnologías emergentes, se establece un modelo replicable para futuros proyectos que busquen maximizar la eficiencia energética y la adaptabilidad al entorno (Sommese *et al.*, 2024).

La metodología y los resultados de este estudio tienen implicaciones significativas para el campo de la arquitectura sostenible. La capacidad de las estructuras para adaptarse dinámicamente a las condiciones ambientales abre nuevas posibilidades en el diseño de edificaciones resilientes y eficientes (Shen *et al.*, 2022). Además, la integración de inteligencia artificial y algoritmos evolutivos en el proceso de diseño permite explorar una amplia gama de soluciones formales y funcionales, optimizando simultáneamente múltiples variables de rendimiento (Zhang *et al.*, 2023).

Se sugiere que futuras investigaciones profundicen en la aplicación de materiales inteligentes y tecnologías emergentes, como superficies reconfigurables y sistemas de fachada cinética, para potenciar aún más la adaptabilidad y eficiencia de las estructuras arquitectónicas (Sommese *et al.*, 2024). La colaboración interdisciplinaria será esencial para desarrollar soluciones integrales que aborden de manera efectiva los desafíos ambientales y sociales actuales. Todo ello se aprecia en las *Figuras, 1 y 2*.



**Figura 1.** Modelos tridimensionales de germinación simétrica (del autor). Estos modelos muestran la disposición inicial de 20 esferas en mallas espaciales, siguiendo el principio de germinación simétrica de Guarino Guarini. La disposición modular se adapta a las variables climáticas mediante algoritmos evolutivos. **Figura 2.** Configuraciones esféricas adaptativas (del autor). Las esferas se reorganizan en respuesta a variables ambientales, aplicando los principios de compenetración y ondulación. Esta adaptación optimiza la eficiencia energética y ventilación natural del espacio.

## Resultados

El diseño arquitectónico basado en principios bioinspirados y tecnologías digitales avanzadas ha demostrado ser altamente efectivo en términos de sostenibilidad, adaptabilidad y eficiencia energética. La configuración modular tridimensional, generada mediante la organización de esferas geométricas, permitió una optimización sustancial en la interacción entre el edificio y su entorno, mejorando tanto el rendimiento energético como el confort interior.

Inicialmente, las 20 esferas distribuidas en cinco niveles, con cuatro esferas por nivel, se modificaron dinámicamente en tamaño y posición en función de las variables ambientales. Los diámetros de las esferas variaron entre 0.2 y 0.99 unidades, lo que permitió ajustar la estructura a las necesidades específicas de captación y dispersión de radiación solar. Las esferas más grandes, ubicadas predominantemente en los niveles superiores, lograron maximizar la absorción de la radiación solar, alcanzando valores cercanos a  $0.26 \text{ kWh/m}^2$  en las mediciones de radiación. Estas cifras indican que las geometrías de mayor tamaño fueron especialmente efectivas para equilibrar la absorción y dispersión de energía, generando una mayor eficiencia en la regulación térmica de la edificación.

Por otro lado, las esferas de diámetros menores, situadas en los niveles inferiores, concentraron la radiación en áreas específicas, generando patrones de alta intensidad lumínica que pudieron aprovecharse para incrementar la ganancia térmica en puntos estratégicos del edificio. Esto permitió un control más preciso de la distribución de luz y calor, logrando optimizar el balance energético interno del espacio. Las esferas con diámetros intermedios, entre 0.5 y 0.7 unidades, generaron un equilibrio óptimo entre la absorción y dispersión de la radiación, manteniendo valores estables de  $0.25 \text{ kWh/m}^2$ . Esto contribuyó a una distribución homogénea de luz y calor a lo largo de las superficies internas, mejorando el rendimiento global del sistema.

La ondulación de las fachadas, resultado de la interacción entre las esferas y el ajuste dinámico de sus diámetros, no solo enriqueció la estética de la edificación, sino que también mejoró su funcionalidad. Los análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD) indicaron que esta morfología ondulante incrementó en un 20% la ventilación natural, favoreciendo la circulación del aire y reduciendo la dependencia de sistemas mecánicos de climatización. Este tipo de circulación natural permitió una regulación más eficiente de la temperatura interna del edificio, disminuyendo en un 25% la carga térmica interna y, por consiguiente, el consumo de energía asociado a sistemas artificiales de ventilación. En términos de iluminación, la disposición geométrica de las esferas en la envolvente arquitectónica, con perforaciones estratégicamente ubicadas, facilitó un control preciso de la entrada de luz natural en el edificio. Las simulaciones lumínicas revelaron una reducción del 40% en la necesidad de iluminación artificial, debido a la adecuada captación y distribución de la luz solar. Las esferas con diámetros variables permitieron una modulación precisa de la luz, generando juegos de luces y sombras que no solo mejoraron la calidad visual de los espacios interiores, sino que también contribuyeron a la eficiencia energética, al reducir el uso de sistemas eléctricos de iluminación.

La implementación de una piel arquitectónica de triple curvatura alrededor de la estructura representó un avance significativo en términos de eficiencia térmica. Esta piel permitió regular eficazmente la transferencia de calor entre el interior y el exterior del edificio, resultando en una reducción del 30% en las pérdidas de calor. Este diseño también optimizó la relación entre el espacio habitable y el área de envolvente, con una superficie total de  $457.78 \text{ m}^2$  y un volumen de  $466.84 \text{ m}^3$ , lo que evidencia una gestión eficiente de los recursos materiales y energéticos.

En cuanto a las mediciones energéticas, el comportamiento térmico de las esferas más grandes demostró una mayor capacidad para ajustar la trayectoria de la radiación incidente, lo que permitió una interacción más eficiente con las variaciones climáticas. Esto

se alineó con el objetivo de maximizar la eficiencia energética mediante una geometría adaptable que respondiera activamente a las condiciones ambientales. Las simulaciones térmicas indicaron que el diseño logró reducir en un 30% las pérdidas de calor, mientras que las simulaciones lumínicas mostraron una distribución homogénea de la iluminación natural, lo que redujo la necesidad de luz artificial.

En este sentido, las simulaciones confirmaron que la integración de algoritmos evolutivos y datos climáticos en tiempo real permitió que el edificio se adaptara dinámicamente, optimizando su eficiencia térmica y lumínica. De igual modo, la morfología ondulante mejoró la ventilación y mitigó las cargas térmicas, logrando un rendimiento energético óptimo. Estos resultados demuestran que el enfoque bioinspirado es eficaz para desarrollar soluciones arquitectónicas sostenibles y adaptativas, equilibrando funcionalidad y estética, con amplias posibilidades para futuras investigaciones. Todo ello se aprecia en las *Figuras 3, 4 y 5*.



3



4



5

**Figura 3.** Edificio bioinspirado con fachadas onduladas (del autor). El edificio presenta una morfología ondulante que maximiza la captación solar y la ventilación natural, basado en los principios de superposición aditiva y compenetración de Guarini.

**Figura 4.** Detalle de la fachada de triple curvatura (del autor). La piel arquitectónica de triple curvatura regula la transferencia térmica y mejora el confort interior. Este diseño reinterpreta el principio de superposición aditiva y estructuración luminosa.

**Figura 5.** Piel arquitectónica con esferas y control de radiación solar (del autor). Las esferas distribuidas estratégicamente en la envolvente arquitectónica modulan la iluminación natural y la eficiencia térmica, utilizando algoritmos para maximizar el rendimiento energético.

## Discusión

La aplicación de los principios compositivos de Guarino Guarini, reinterpretados a través de tecnologías digitales avanzadas, se alinea con tendencias emergentes en la arquitectura sostenible y adaptativa. La integración de materiales inteligentes, inteligencia artificial y sistemas reconfigurables está transformando la manera en que los edificios interactúan con su entorno, ofreciendo soluciones innovadoras para los desafíos contemporáneos.

Un aspecto clave en esta transformación es la implementación de materiales adaptativos que imitan procesos naturales para responder a condiciones ambientales variables. Somnese *et al.* (2024) presentan un sistema de fachada cinética bioinspirada basado en el comportamiento de la flor *Gazania*, que ajusta la entrada de luz natural en función de la radiación solar. Este sistema utiliza polímeros con memoria de forma que reaccionan autónomamente a las variaciones lumínicas, eliminando la necesidad de sistemas de control mecánico y reduciendo el consumo energético. La incorporación de materiales fotosensibles representa un avance significativo en la sostenibilidad arquitectónica, ya que emula mecanismos naturales para optimizar el rendimiento energético de los edificios.

En consonancia con este enfoque, nuestro estudio aplicó el principio de estructuración luminosa de Guarini mediante la integración de perforaciones estratégicas en las fachadas. Las simulaciones realizadas indicaron una reducción del 40% en la necesidad de iluminación artificial, lo que contribuye a disminuir el consumo energético y mejorar el confort visual de los ocupantes. Este resultado es consistente con los hallazgos de Somnese *et al.* (2024), subrayando la eficacia de utilizar elementos bioinspirados para optimizar la eficiencia energética.

La inteligencia artificial (IA) juega un papel crucial en la generación y optimización de diseños arquitectónicos adaptativos. Li *et al.* (2023) destacan que la IA generativa facilita la creación rápida de planos conceptuales y modelos tridimensionales a partir de bocetos simples, acelerando la fase de ideación y permitiendo explorar múltiples alternativas de diseño. En el contexto del diseño bioinspirado, la IA puede replicar patrones naturales de crecimiento y adaptación, generando formas arquitectónicas que evolucionan en respuesta a las condiciones ambientales y las necesidades del entorno. Este enfoque fue esencial en nuestro estudio, donde los algoritmos evolutivos permitieron simular el principio de penetración de Guarini, generando una continuidad espacial que difumina las fronteras entre el interior y el exterior del edificio.

La investigación en redes neuronales no paramétricas ofrece nuevas oportunidades para la optimización del diseño arquitectónico. Zhang *et al.* (2023) señalan que estas redes pueden aplicarse en el análisis de nubes de puntos tridimensionales, permitiendo una representación geométrica precisa de las estructuras bioinspiradas sin necesidad de entrenamientos extensos. Esta capacidad es fundamental para manejar grandes volúmenes de datos geométricos y ambientales, facilitando la exploración de una mayor cantidad de alternativas de diseño y ajustando dinámicamente las formas de los edificios en función de información en tiempo real. En nuestro estudio, la utilización de estas redes mejoró la eficiencia del proceso de diseño y permitió una adaptación más precisa a las condiciones ambientales específicas.

El desarrollo de superficies inteligentes reconfigurables complementa los diseños arquitectónicos bioinspirados al proporcionar una mayor eficiencia en la manipulación de las condiciones ambientales externas. Shen *et al.* (2022) proponen superficies capaces de ajustar no solo las fases, sino también las magnitudes de las ondas que inciden en ellas, optimizando la recepción de energía solar o reduciendo el impacto de condiciones climáticas adversas. La integración de estas superficies con diseños bioinspirados amplía el potencial de las estructuras arquitectónicas para interactuar eficientemente con su entorno, mejorando tanto el confort térmico como la eficiencia energética de las edificaciones.

La combinación de materiales inteligentes, inteligencia artificial y superficies reconfigurables ofrece un enfoque holístico para el diseño arquitectónico, permitiendo que las estructuras sean capaces de adaptarse dinámicamente a las condiciones cambiantes del entorno. Estos avances tecnológicos, cuando se aplican en conjunto, pueden transformar la manera en que concebimos la arquitectura, proporcionando soluciones sostenibles que responden a los desafíos del cambio climático y la demanda de eficiencia energética (Sommese *et al.*, 2024). En nuestro estudio, la integración de estas tecnologías permitió desarrollar un modelo arquitectónico que no solo es eficiente desde el punto de vista energético, sino que también ofrece un alto grado de adaptabilidad y confort a los usuarios.

Este enfoque transdisciplinario refleja la tendencia hacia una arquitectura más inteligente y conectada, donde las estructuras no solo existen en su entorno, sino que interactúan activamente con él. La reinterpretación de los principios de Guarini en este contexto demuestra que es posible combinar conocimientos históricos con tecnologías emergentes para crear soluciones innovadoras y prácticas. La aplicación exitosa de la germinación simétrica, compenetración, ondulación, superposición aditiva y estructuración luminosa mediante herramientas digitales avanzadas valida la relevancia de estos principios en el diseño contemporáneo y aporta una metodología replicable para futuros proyectos arquitectónicos sostenibles.

Es importante señalar que la adaptabilidad y resiliencia de las estructuras arquitectónicas son esenciales en un contexto de creciente incertidumbre climática. La capacidad de los edificios para responder eficazmente a los cambios ambientales no solo mejora su eficiencia energética, sino que también aumenta el confort y bienestar de sus ocupantes. La arquitectura bioinspirada, apoyada por tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial y los materiales inteligentes, tiene el potencial de convertirse en un pilar fundamental de un nuevo paradigma arquitectónico centrado en la sostenibilidad y la resiliencia (Li *et al.*, 2023). Finalmente, la colaboración interdisciplinaria será crucial para avanzar en este campo. La integración de conocimientos de arquitectura, ingeniería, ciencia de materiales y ciencias ambientales permitirá desarrollar soluciones más completas y efectivas. Nuestro estudio contribuye a este diálogo, demostrando cómo la combinación de principios históricos y tecnologías modernas puede abordar los desafíos actuales en arquitectura sostenible y adaptativa.

## Conclusiones

La investigación realizada confirma que la aplicación de los principios compositivos de Guarino Guarini, reinterpretados a través de tecnologías digitales avanzadas, constituye un enfoque viable para enfrentar los desafíos contemporáneos de la arquitectura sostenible y adaptativa. La incorporación de conceptos como la germinación simétrica, la compenetración, la ondulación, la superposición aditiva y la estructuración luminosa no solo ha permitido la creación de espacios dinámicos y complejos, sino que también ha demostrado su eficacia para optimizar la interacción con el entorno, favoreciendo la eficiencia energética y la sostenibilidad.

El principio de germinación simétrica ha sido crucial para la generación de estructuras adaptativas, que responden de manera eficaz a las variables climáticas, mejorando la ventilación y optimizando la distribución espacial. Asimismo, la compenetración y la ondulación han facilitado la integración entre el interior y el exterior de los edificios, proporcionando una continuidad espacial que fomenta una mayor sinergia con el entorno natural, mejorando tanto el confort térmico como la eficiencia lumínica.

Por su parte, la superposición aditiva ha mostrado un alto potencial para el desarrollo de envolventes arquitectónicas inteligentes, capaces de modular de manera eficiente la transferencia de calor, contribuyendo de forma significativa a la reducción del consumo energético. La estructuración luminosa, implementada mediante un diseño geométrico estratégico, ha optimizado la captación de luz natural, minimizando la dependencia de la iluminación artificial y mejorando la calidad visual y perceptiva de los espacios interiores. Finalmente, la integración de datos ambientales en tiempo real y el uso de algoritmos evolutivos ha permitido una adaptabilidad arquitectónica continua y precisa, demostrando que es posible diseñar edificaciones que respondan activamente a las condiciones ambientales cambiantes. Esta convergencia entre los principios arquitectónicos históricos y las tecnologías contemporáneas marca un nuevo paradigma en la arquitectura bioinspirada, donde la innovación formal se equilibra con las exigencias funcionales y ambientales del siglo XXI.

Este estudio abre nuevas posibilidades para la exploración futura de soluciones habitacionales sostenibles, que integren de manera aún más profunda materiales inteligentes y sistemas de control adaptativos. En este sentido, la colaboración interdisciplinaria se presenta como un factor clave para el desarrollo de estructuras que respondan eficazmente a las demandas actuales de sostenibilidad y habitabilidad.

## Referencias bibliográficas

- Bateson, G., & Bateson, W. (2000). *Steps to an Ecology of Mind*. University of Chicago Press.
- Fraile Narváez, M. (2023). *Arquitectura digital bioinspirada: Hacia un nuevo paradigma de vivienda sostenible*. Universidad Rey Juan Carlos.
- Guo, Z., Li, H., & Shi, J. (2024). MgFNO: Multi-grid architecture Fourier neural operator for parametric partial differential equations. *arXiv preprint arXiv:2407.08615v2*.

- Li, P., Li, B., & Li, Z. (2023). Sketch-to-Architecture: Generative AI-aided architectural design ideation. *Pacific Graphics*.
- Macera, M., & Delmastro, F. (2004). Guarino Guarini, Mathematics and Architecture: The Restoration of the Chapel of the Shroud in Turin. *Nexus Network Journal*, 6(2), 73-91.
- Mitrović, B. (2021). *Guarino Guarini, Baroque Scholasticism and the Scientific Revolution*. Harvard University Press.
- Piazza, S. (2016). *Guarino Guarini e la Chiesa dei Padri Somaschi a Messina*. Edizioni Caracol.
- Portoghesi, P. (1985). *El ángel de la historia*. Madrid: Hermann Blume.
- Roero, C. S. (2009). Guarino Guarini and Universal Mathematics. *Nexus Network Journal*, 11(3), 415-439.
- Schumacher, P. (2017). *The Autopoiesis of Architecture: A New Framework for Architecture*. John Wiley & Sons.
- Shen, S., Clerckx, B., & Murch, R. (2022). Modeling and architecture design of reconfigurable intelligent surfaces using scattering parameter network analysis. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 21(2), 1229-1239.
- Snooks, R. (2019). *Algorithmic Design in Architecture: From Nature to Code*. *Architectural Design*.
- Sommese, F., Hosseini, S. M., Badarnah, L., Capozzi, F., Giordano, S., & Ambrogi, V. (2024). Light-responsive kinetic façade system inspired by the Gazania flower: A biomimetic approach in parametric design for daylighting. *Building and Environment*, 247, 111052.
- Williams, K., & Caparrini, S. (2004). *Guarino Guarini: Geometry of the Sun*.
- Zhang, R., Wang, L., & Guo, Z. (2023). Parameter is not all you need: Starting from non-parametric networks for 3D point cloud analysis. *arXiv preprint arXiv:2303.08134v2*.

---

**Abstract:** This article explores the intersection between architecture and contemporary digital technologies to propose a sustainable housing model inspired by Guarino Guarini's compositional principles. Based on biological and mathematical foundations, the study takes as reference the concept of symmetry as absence of information, developed by William and Gregory Bateson, as well as the natural growth patterns of rock gardens, to guide the design process. Guarini's five compositional principles-symmetrical germination, undulation, interpenetration, additive superposition and luminous structuring-are reinterpreted through the use of advanced digital systems, generating modular and eco-sustainable spaces. The digital translation of these architectural principles is carried out using algorithms and artificial intelligence, which develop three-dimensional cells evoking complex and dynamic spatial configurations. This approach not only integrates functional and environmental considerations, but also explores new formal and structural possibilities. Preliminary results indicate that the digital adaptation of these principles generates a dynamic evolutionary model, going beyond conventional housing solutions and balancing formal innovation with functionality. The research highlights the potential of combining architectural theories with cutting-edge digital technologies to create innovative and sus-

tainable residential spaces, thus expanding the possibilities for future architectural design and construction.

**Keywords:** Symmetry - Nature - Modular design - Eco-sustainability - Compositional principles

**Resumo:** Este artigo explora a interseção entre a arquitetura e as tecnologias digitais contemporâneas para propor um modelo de habitação sustentável inspirado nos princípios de composição de Guarino Guarini. Com base em fundamentos biológicos e matemáticos, o estudo toma como referência o conceito de simetria como ausência de informação, desenvolvido por William e Gregory Bateson, bem como os padrões de crescimento natural dos jardins de pedra, para orientar o processo de design. Os cinco princípios de composição de Guarini - germinação simétrica, ondulação, interpenetração, superposição aditiva e estruturação luminosa - são reinterpretados por meio do uso de sistemas digitais avançados, gerando espaços modulares e eco-sustentáveis. A tradução digital desses princípios arquitetônicos é realizada por meio de algoritmos e inteligência artificial, que desenvolvem células tridimensionais que evocam configurações espaciais complexas e dinâmicas. Essa abordagem não apenas integra considerações funcionais e ambientais, mas também explora novas possibilidades formais e estruturais. Os resultados preliminares indicam que a adaptação digital desses princípios gera um modelo evolutivo dinâmico, indo além das soluções habitacionais convencionais e equilibrando a inovação formal com a funcionalidade. A pesquisa destaca o potencial da combinação de teorias arquitetônicas com tecnologias digitais de ponta para criar espaços residenciais inovadores e sustentáveis, expandindo assim as possibilidades de projetos e construções arquitetônicas futuras.

**Palavras-chave:** Simetria - Natureza - Projeto modular - Eco-sustentabilidade - Princípios de composição

---