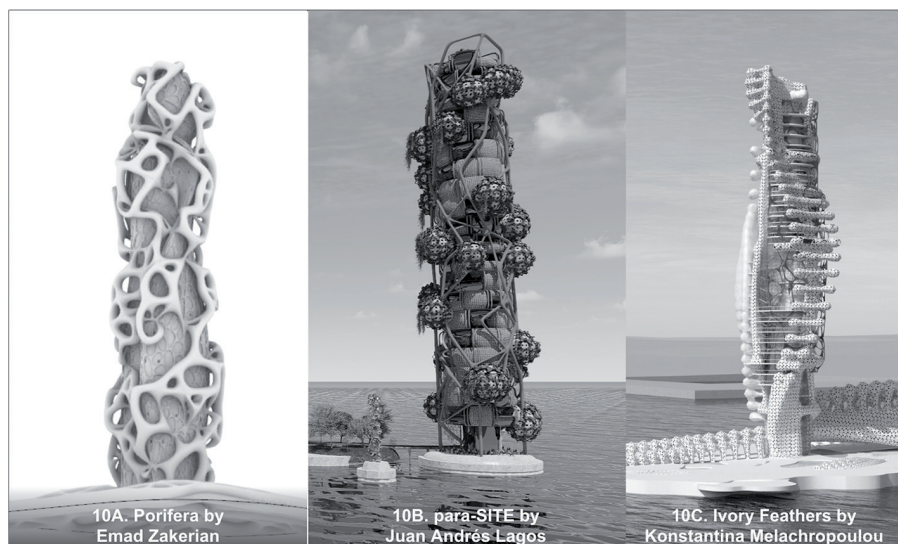


exoesqueleto externo masivo y grueso y un exoesqueleto interno delicado e íntimo que está más cerca del sistema de acristalamiento estructural. La *Figura 10B* muestra el proyecto Para-SITE de Juan Andrés Lagos. Juan Andrés implementa el exoesqueleto algorítmico como un sistema que soporta y fusiona dos componentes distintos. Uno es el sistema de apilamiento de pisos y el otro es una apariencia aleatoria de manchas esféricas. Esta implementación demuestra cómo el exoesqueleto algorítmico se puede implementar para soportar dos geometrías y topologías completamente distintas al mismo tiempo, sirviendo así como un agente estructural de unión externo. La *Figura 10C* muestra el proyecto Ivory Feathers de Konstantina Melachropoulou. Konstantina rompe el sistema de construcción convencional de núcleo-carcasa para una torre y desarrolla un exoesqueleto algorítmico que sirve tanto de núcleo como de carcasa según la necesidad. En este caso, el exoesqueleto algorítmico sustenta estructuralmente una actividad en lugar de una forma. Su proyecto también demuestra la fractalidad dentro de las escalas y los rendimientos del exoesqueleto algorítmico, donde cada nivel del exoesqueleto es reforzado y andamiado por un exoesqueleto, que a su vez es reforzado y andamiado por su predecesor.



4. Discusión

La investigación sobre exoesqueletos algorítmicos fue un ejercicio revelador que proporcionó beneficios empíricos del bioaprendizaje y la arquitectura biodigital. Además, la extrapolación del algoritmo a tres escalas y casos de uso distintos fue una implementación astuta. Sin embargo, la investigación debe probarse en términos de creación de prototipos a diferentes escalas. La investigación se beneficiaría enormemente de la experimentación con diferentes materiales para diferentes escalas y la introducción de materiales de bioingeniería para minimizar la huella de carbono. El uso de redes neuronales artificiales (RNA) para la optimización de materiales podría ser un posible próximo paso para llevar la investigación a la industria. No obstante, los exoesqueletos algorítmicos brindan algunas contribuciones clave en los campos del diseño, la computación y la educación en diseño.

4.1. Contribución al diseño

La segregación sistemática del proceso de diseño arquitectónico en forma de análisis, modelado y creación de prototipos es un remanente arcaico del movimiento racional-funcionalista en el diseño arquitectónico. Sin embargo, los hitos recientes alcanzados por la fusión del diseño computacional y la fabricación digital han ayudado a los arquitectos y diseñadores a romper esas restricciones y explorar nuevas formas de diseño. Los algoritmos de diseño procedimental son una de esas formas de establecer una sintaxis de diseño y preparar una receta de diseño para iterar a través de varias soluciones de diseño, mientras se mantiene el proceso paramétrico, iterativo, recursivo y, sin embargo, discreto. El exoesqueleto algorítmico es uno de esos algoritmos de diseño procedimental que ayudaría a los diseñadores a explorar alternativas de diseño, mientras se mantiene el resultado del diseño para comportarse y operar como un exoesqueleto orgánico, como una carcasa o armadura, que sirve tanto como estructura como piel para un organismo. El exoesqueleto algorítmico ciertamente demostraría ser una adición necesaria al inventario del diseñador.

4.2. Contribución a la computación

Aunque se han generado una gran cantidad de modelos de simulación biológica para estudiar los patrones de crecimiento y descomposición de órganos, organismos, enjambres y ecosistemas, muy pocos de ellos han logrado pasar al ámbito del diseño. Además, a pesar de que la implementación de dichos modelos de simulación ha sido la base del diseño generativo (ya sea gráfico, de productos o arquitectónico), no existen algoritmos de diseño procedimental definitivos para generar exoesqueletos que puedan servir tanto como estructura como piel. Por lo tanto, la investigación sobre exoesqueletos algorítmicos ayuda a ampliar el inventario de algoritmos de diseño disponibles que podrían derivarse de un fenómeno orgánico: el ciclo de crecimiento y muda de los exoesqueletos. Esta investigación también ayuda a establecer cómo se podrían utilizar los algoritmos de diseño procedimental para generar diseños en todas las escalas respetando la ley del cubo cuadrado.

4.3. Contribución a la enseñanza del diseño

La implementación pedagógica de algoritmos de diseño procedimental es un concepto novedoso ofrecido en el Programa de Maestría en Arquitectura Biodigital de la UIC Barcelona. Los exoesqueletos algorítmicos forman parte integral del extenso inventario de algoritmos de diseño procedimental. Como se ilustra en la sección 3.3, el exoesqueleto algorítmico sirve como transcripción documental para la implementación práctica del bioaprendizaje. Los estudiantes no sólo aprenden a transcribir fenómenos biológicos en un algoritmo de diseño procedimental legible, programable y utilizable, sino que también usan este algoritmo para generar una geometría compleja que cumple la función de carcasa, armadura y revestimiento para la tipología específica de una torre residencial. El exoesqueleto algorítmico también podría servir como modelo para los estudiantes como mecanismo operativo estándar para generar sus contrapartes orgánicas.

Referencias bibliográficas

- Chen, P., Yu-Min Lin, A., McKittrick, J., & Meyers, M.A. (2008). Structure and mechanical properties of crab exoskeletons. *Acta Biomaterialia*, 4(3), 587-596.
- Dollens, D. (2019). AI-to-Microbe Architecture: Simulation, Intelligence, Consciousness. *DeSForM 2019 Beyond Intelligence*, 71-77.
- Eder, M., Amini, S., & Fratzl, P. (2018). Biological composites—complex structures for functional diversity. *Science*, 362(6414), 543-547.
- Estévez, A.T. (2023). Bioaprendizaje para una arquitectura y diseño sostenibles. *Cuaderno*, 190, Centro de Estudios en Diseño y Comunicación, 65-88.
- Estévez, A.T. (2009). Biodigital Architecture. *Session 19: New Design Concepts and Strategies 3 - eCAADe 27*, 681-686.
- Fabritius, H., Sachs, C., Raabe, D., Nikolov, S., Friák, M., & Neugebauer, J. (2011). Chitin in the Exoskeletons of Arthropoda: From Ancient Design to Novel Materials Science. En Gupta, N. (eds.). *Chitin: Formation and Diagenesis*, 34, 35-60. Dordrecht: Springer.
- Galilei, G. (1638). *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche Intorno à Due Nuove Scienze Attenenti alla Meccànica & i Movimenti Locali*. Leiden: Elsevier.
- Guttman, A. (1984). R-trees. A dynamic index structure for spatial searching. *Proceedings of the 1984 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data – SIGMOD’84*, 47. DOI: 10.1145/602259.602266.
- McNeel, R. (2024). *Rhinoceros 3D (Versión 8.0.)* [software]. Rhino3d.com. <https://www.rhino3d.com/>.
- OMG–Object Management Group (2017). *OMG® Unified Modelling Language® (OMG UML®) Version 2.5.1*. Milford, Massachusetts: OMG Group, 754.
- Oxman, N. (2010). *Material-based Design Computation*. Tesis doctoral. MIT, Massachusetts Institute of Technology.

- Page, A. & Johnstone, I.L. (2007). The cuticle. En Kramer, J.M. & Moerman, D.G. (eds.). *The Wormbook*. The C. elegans Research Community, WormBook. doi/10.1895/ worm-book.1.138.1.
- Preisinger, C. (2013), Linking Structure and Parametric Geometry. *Architectural Design*, 83, 110-113. DOI: 10.1002/ad.1564.

Abstract: Organic exoskeletons of crustaceans, scaphopods and pericarps possess intelligent structural integrity despite their anisotropic growth and moulting cycles. This research on algorithmic exoskeletons focuses on extracting the biointelligent nature of the anisotropic structural integrity found in exoskeletons for implementation as procedural design algorithms. This article illustrates 3 key stages in the extraction of biointelligence: first, the documentation of the transcription of algorithmic exoskeletons from biological simulation models while using UML diagrams within the Rhinoceros® and Grasshopper® design and modelling platforms; second, the illustration of iterative results generated by implementing algorithmic exoskeletons at 3 different scales, jewellery, product design and architecture; and third, the biodigital pedagogical application of algorithmic exoskeletons on biointelligence extraction, biolearning and the implementation of procedural design algorithms in their workflows. The results demonstrate a methodology for transcribing existing biosimulation models into procedural design algorithms that could be used in the design industry. The implementation of procedural design algorithms at different scales and the iterations generated demonstrate how the scale of the design typology does not limit the implementation of algorithmic exoskeletons.

Keywords: Biodigital architecture - Procedural design - Computational design - Exoskeleton - Biological simulation - Biological design

Resumo: Os exoesqueletos orgânicos de crustáceos, escafópodes e pericarpos possuem integridade estrutural inteligente apesar de seu crescimento anisotrópico e ciclos de muda. Esta pesquisa sobre exoesqueletos algorítmicos concentra-se em extrair a natureza biointeligente da integridade estrutural anisotrópica encontrada nos exoesqueletos para implementação como algoritmos de design processual. Este artigo ilustra três estágios principais na extração da biointeligência: Primeiro, a documentação da transcrição de exoesqueletos algorítmicos de modelos de simulação biológica usando diagramas UML nas plataformas de design e modelagem Rhinoceros® e Grasshopper®; segundo, a ilustração dos resultados iterativos gerados pela implementação de exoesqueletos algorítmicos em três escalas diferentes: joalheria, design de produtos e arquitetura; e terceiro, a aplicação pedagógica biodigital de exoesqueletos algorítmicos na extração de biointeligência, bioaprendizagem e implementação de algoritmos de design processual em seus fluxos de trabalho. Os resultados demonstram uma metodologia para transcrever modelos de biossimulação existentes em algoritmos de design processual que poderiam ser usados no setor de design. A implementação de algoritmos de design procedural em diferentes escalas e as iterações

geradas demonstram como a escala da tipologia de design não limita a implementação de exoesqueletos algorítmicos.

Palavras-chave: Arquitetura biodigital - Design procedural - Design computacional - Exoesqueleto - Simulação biológica - Design biológico
