Fecha de recepción: enero 2025
Fecha de aceptación: febrero 2025
Versión final: marzo 2025

Exoesqueletos algorítmicos: extracción de biointeligencia de exoesqueletos orgánicos encontrados en la naturaleza para desarrollar algoritmos de diseño procedimental

Angad Warang [1] y Alberto T. Estévez [2]

Resumen: Los exoesqueletos orgánicos de crustáceos, escafópodos y pericarpios poseen una integridad estructural inteligente a pesar de sus ciclos anisotrópicos de crecimiento y muda. Esta investigación sobre exoesqueletos algorítmicos se centra en extraer la naturaleza biointeligente de la integridad estructural anisotrópica que se encuentra en los exoesqueletos para implementarla como algoritmos de diseño procedimental. Este artículo ilustra 3 etapas clave en la extracción de biointeligencia: primero, la documentación de la transcripción de exoesqueletos algorítmicos a partir de modelos de simulación biológica mientras se utilizan diagramas UML dentro de las plataformas de diseño y modelado de Rhinoceros® y Grasshopper®; segundo, la ilustración de los resultados iterativos generados mediante la implementación de exoesqueletos algorítmicos en 3 escalas distintas, joyería, diseño de productos y arquitectura; y tercero, la aplicación pedagógica biodigital de exoesqueletos algorítmicos sobre la extracción de biointeligencia, el bioaprendizaje y la implementación de algoritmos de diseño procedimental en sus flujos de trabajo. Los resultados demuestran una metodología para transcribir modelos de biosimulación existentes en algoritmos de diseño procedimental que podrían utilizarse en la industria del diseño. La implementación de algoritmos de diseño procedimental en diferentes escalas y las iteraciones generadas demuestran cómo la escala de la tipología de diseño no limita la implementación de exoesqueletos algorítmicos.

Palabras clave: Arquitectura biodigital - Diseño procedimental - Diseño computacional - Exoesqueleto - Simulación biológica

[Resúmenes en inglés y portugués en las páginas 91-92]

[1] **Angad Warang** es originario de India, es miembro del iBAG-UIC Barcelona (Institute for Biodigital Architecture & Genetics), miembro del GENARQ (Grupo de Investigación Consolidado y Competitivo Genetic Architectures), y profesor del Máster en Arquitectura Biodigital de la ESARQ-UIC Barcelona, la School of Architecture de la Universitat Internacional de Catalunya. Dirigido ahí por Alberto T. Estévez, se gradúa como Doctor en Arquitectura (2022) y como Máster en Arquitectura Biodigital (2017): antes, Graduado en Arquitectura (2012). Arquitecto especialista en diseño computacional y fabricación digital, su trabajo se encuentra en la intersección de la investigación en diseño, la educación en diseño, y la práctica arquitectónica. Además de las actividades de enseñanza mencionadas,

realiza con frecuencia talleres tanto en formato en línea como presencial. Y como resultado de sus actividades de investigación ha realizado numerosas publicaciones en forma de capítulos de libros, artículos de revistas y actas de congresos. (https://angadwarang.wixsite.com/2021).

(2) **Alberto T. Estévez** es Arquitecto (UPC, 1983), Doctor en Ciencias (Arquitectura, UPC, 1990), Historiador del Arte (UB, 1994), Doctor en Letras (Historia del Arte, UB, 2008), con oficina de arquitectura y diseño en Barcelona (1983-hoy). 40 años de docencia e investigación en diversas universidades. Fundador y primer Director de la ESARQ - UIC Barcelona School of Architecture (1996), donde ejerce como Catedrático de Arquitectura. Creador del grupo de investigación, máster y doctorado "Historia, Arquitectura y Diseño" (UIC, 1998-hoy), y del grupo de investigación, máster y doctorado "Arquitecturas Genéticas" (UIC, 2000-hoy), actualmente Máster de Arquitectura Biodigital. Así como creador del Máster de Cooperación Internacional con Alex Levi y Amanda Schachter (UIC, 2004-hoy). Con más de tres centenares de publicaciones, decenas de exposiciones, congresos y comités, e invitado a impartir más de 100 conferencias internacionales sobre sus ideas y trabajos. Ha sido Director de 29 tesis doctorales, y de más de cien tesis de máster y grado. Con 6 sexenios de investigación oficialmente reconocidos. Fundador-Director del iBAG-UIC Barcelona (Institute for Biodigital Architecture & Genetics), y Fundador del Doctorado en Arquitectura de la UIC Barcelona, del que ha sido su primer Director. Últimamente fue también Vicerrector-Gerente de la UIC Barcelona (Universitat Internacional de Catalunya).

1. Introducción

Los exoesqueletos orgánicos son tegumentos endurecidos formados por la deposición metabólica combinatoria de vidrio de sílice, carbonato de calcio, quitina, celulosa o queratina. Se encuentran principalmente en artrópodos (insectos como escarabajos y abejas, quelicerados como escorpiones y cangrejos herradura, miriápodos como milpiés y lombrices de tierra, y crustáceos como langostas y percebes), escleractinios (típicamente corales duros) y moluscos (como los caracoles, las almejas y los escafópodos) los exoesqueletos cumplen diversas funciones, desde mantener la integridad estructural del organismo hasta proporcionar conchas o armaduras defensivas, como dispositivo somatosensorial, como medio para rituales de apareamiento o exhibiciones territoriales y como barrera osmótica contra la desecación. Aunque no se clasifican como exoesqueletos en su sentido biológico estricto, los pericarpios (especialmente los de frutos secos como los pistachos, los cacahuetes y las nueces) también podrían considerarse como exoesqueletos considerando las similitudes en sus morfologías y funcionalidades (principalmente en términos de proporcionar integridad estructural a la semilla y una concha o armadura defensiva) (Eder *et al*, 2018).
Estas funcionalidades tienen enormes similitudes con elementos de las envolventes de los edificios, como paredes, techos, marquesinas, ventanas y fachadas. Por lo tanto, un estudio

de su morfología y la transliteración de este estudio en algoritmos de diseño procedimental (algoritmos de diseño que son paramétricos, iterativos y recursivos) podría ser una importante adición al inventario de diseño de arquitectos, diseñadores de productos, diseñadores de joyas y diseñadores de muebles. La investigación sobre exoesqueletos algorítmicos y este artículo proporcionan una metodología secuencial para extraer la biointeligencia de exoesqueletos orgánicos (principalmente exoesqueletos quitinosos que poseen los crustáceos) para implementarlos como algoritmos de diseño procedimental para diseñar en 3 escalas distintas utilizando software de diseño computacional.

1.1. Exoesqueletos quitinosos

En los artrópodos, el exoesqueleto está compuesto principalmente de quitina y una variedad de proteínas, formando una cutícula que sirve como capa protectora externa. Este exoesqueleto está formado por elementos esqueléticos cuyas propiedades físicas están específicamente adaptadas para satisfacer las demandas funcionales y ecofisiológicas del organismo (Fabritius *et al*, 2011).
En general, estas adaptaciones dan como resultado una dureza variable del exoesqueleto según la parte del cuerpo que éste protege. En otras palabras, el grosor y la composición de la cutícula varían si el cuerpo requiere rigidez o elasticidad del exoesqueleto.
La estructura jerárquica clara y bien definida de los exoesqueletos quitinosos ha hecho que sea más fácil para los biólogos comprender y documentar las diversas propiedades de cada capa y componente estructural (Chen *et al*, 2008). Por lo tanto, a esta altura se ha aceptado ampliamente que los exoesqueletos quitinosos experimentan biomineralización, donde un mineral (generalmente carbonato de calcio) se deposita entre las fibras de quitina. Como resultado de este fenómeno, los exoesqueletos tienden a tener una morfología, composición y estructura anisotrópicas.
Este crecimiento anisotrópico, que se explicará más a fondo en este artículo, es un sistema inteligente que se encuentra en la naturaleza y que resuelve un desafío fisiológico específico que plantea la morfología de los exoesqueletos. Aunque los exoesqueletos son hermosos (como cualquier otro sistema biológico, según las definiciones más clásicas de "belleza"), su belleza podría llegar a considerarse (falsamente) subjetiva y, por lo tanto, desarrollar un algoritmo que imite o replique su morfología sería redundante. Sin embargo, desarrollar un algoritmo de diseño procedimental que emule la biointeligencia (Dollens, 2019) exhibida por su estructura anisotrópica sería una adición significativa al inventario de diseño.

1.2. Algoritmos de diseño procedimental

El diseño procedimental es una nueva metodología de diseño que genera datos de diseño de forma algorítmica en lugar de hacerlo de forma manual. El objetivo de esta metodología de diseño es automatizar el proceso de diseño al mismo tiempo que se controlan los parámetros clave que eventualmente afectarán el resultado del diseño y no al revés, como generalmente se hace con las metodologías de diseño tradicionales regidas por sistemas CAD.

La metodología de diseño tradicional se ha dividido principalmente en análisis, modelado y creación de prototipos (Oxman, 2010). Esta división hace que el proceso de diseño sea consecuente con cada paso (normalmente se realiza en el orden mencionado anteriormente: análisis, luego modelado y luego creación de prototipos y, en caso de una revisión, se repite la secuencia). Además, restringe a los diseñadores el uso del poder computacional que está a su disposición. Por ejemplo, el software de diseño computacional y las herramientas de fabricación digital que son bastante omnipresentes en la cuarta revolución industrial, permanecen intactos por la metodología de diseño tradicional (especialmente en la industria AEC).
Los algoritmos de diseño procedimental proporcionan así una respuesta evidente y empírica a este viejo problema de modernización en el campo del diseño. Por ello, el uso de algoritmos se vuelve imperativo para la aplicación del diseño procedimental. Además, la implementación de activos (herramientas, complementos y repositorios presentes en entornos e interfaces de software) que se puedan utilizar fácilmente en software de modelado computacional como Rhinoceros® (McNeel, 2024) y software de programación visual como Grasshopper® podría resultar crucial para establecer los algoritmos de diseño procedimental.
En las últimas décadas se han generado y probado una gran cantidad de modelos de simulación biológica para ilustrar fenómenos biológicos. Muchos de estos modelos de simulación existentes podrían traducirse en algoritmos de diseño procedimental utilizando los recursos disponibles en el software y los complementos (mencionados anteriormente). Todo este procedimiento de extracción de la biointeligencia que existe en los sistemas orgánicos y los fenómenos naturales (puramente biológicos y no geológicos) y su conversión en un algoritmo de diseño procedimental puede denominarse también bioaprendizaje.

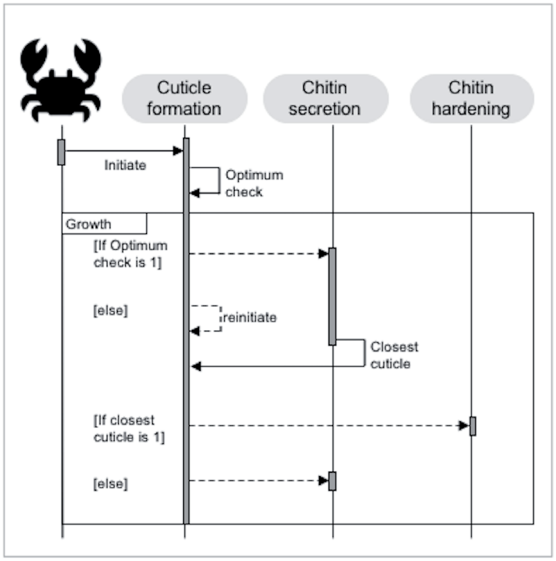
1.3. Exoesqueletos algorítmicos

Aunque se han realizado numerosas investigaciones sobre el modelado de la morfología de los exoesqueletos, principalmente para fabricarlos utilizando azúcares y proteínas, no existen algoritmos definitivos de diseño procedimental para generar exoesqueletos que puedan servir tanto como estructura como piel. Además, es necesario que existan más algoritmos de diseño computacional que puedan derivarse de algoritmos de simulación biológica, que puedan aplicarse potencialmente a algoritmos de diseño procedimental, y que puedan utilizarse en la industria del diseño para el modelado, análisis y creación de prototipos.
Por tanto, esta investigación se centra en extraer esta biointeligencia de la integridad estructural anisotrópica encontrada en los exoesqueletos de crustáceos, escafópodos y pericarpios para implementarla en algoritmos de diseño procedimental. Este artículo ilustra 3 etapas clave en la extracción de biointeligencia en forma de exoesqueletos algorítmicos. En primer lugar, la documentación del bioaprendizaje de los exoesqueletos algorítmicos, que es la transcripción de la lógica computacional de los exoesqueletos en algoritmos de diseño procedimental dentro de las plataformas de diseño y modelado de Rhinoceros® (McNeel, 2024) y su complemento de programación visual, Grasshopper®. En segundo lugar, la ilustración de los posibles resultados iterativos generados mediante la implementación

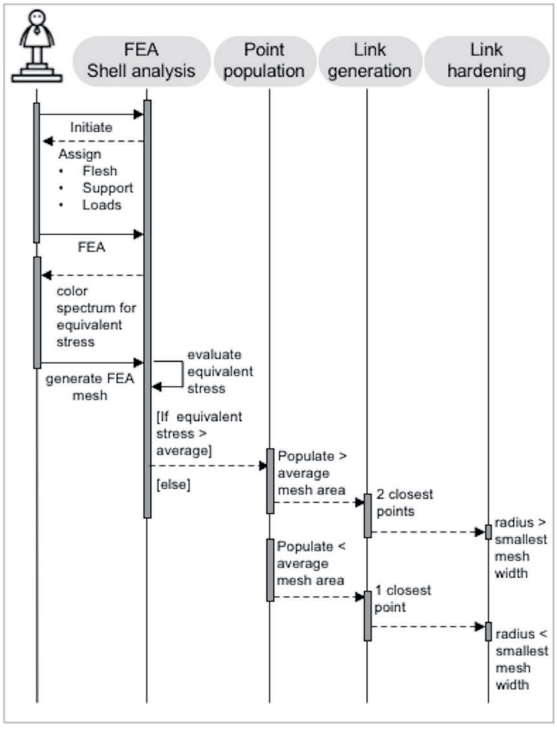
de exoesqueletos algorítmicos en 3 escalas distintas de diseño: diseño de joyas, diseño de productos y diseño arquitectónico. Y, en tercer lugar, la aplicación pedagógica de los exoesqueletos algorítmicos en la enseñanza de diseño y arquitectura biodigital (Estévez, 2009), sobre la extracción de biointeligencia, el bioaprendizaje y la implementación de algoritmos de diseño procedimental en sus flujos de trabajo, que son biodigitales.
Los resultados consignados en este artículo demuestran una metodología clara y coherente para transcribir algoritmos computacionales existentes en el campo de la simulación biológica, específicamente en exoesqueletos derivados de crustáceos, artrópodos y vainas de semillas, en algoritmos de diseño procedimental que podrían usarse en la industria del diseño para modelado y análisis. La documentación de algoritmos de diseño procedimental en este artículo y la documentación de sus iteraciones posteriores también ilustran cómo la escala de la tipología de diseño o el tamaño del resultado no limitarían la implementación de exoesqueletos algorítmicos. El artículo también explica cómo el flujo de trabajo de bioaprendizaje (transcribir una lógica computacional existente en un algoritmo de diseño procedimental) podría usarse como un mecanismo instructivo en la enseñanza de diseño y arquitectura biodigital.

2. Metodología

Como se describió anteriormente, la metodología se centra principalmente en el bioaprendizaje, lo que implica la transliteración del modelo de simulación biológica (en este caso, el ciclo de crecimiento de un exoesqueleto orgánico) en un algoritmo de diseño procedimental que genera un exoesqueleto sobre la geometría de referencia. Para extraer la biointeligencia que existe en los exoesqueletos orgánicos, especialmente los exoesqueletos quitinosos de los crustáceos, el crecimiento anisotrópico y la eventual integridad estructural del exoesqueleto tuvieron que entenderse y programarse como un diagrama de secuencia UML de biosimulación (versión 2.5.1) (OMG, 2017), como se muestra a continuación en la *Figura 1*. Se basa en la formación de la cutícula de la langosta americana *Homarus americanus*, ya que ha demostrado ser un espécimen ideal para estudiar biocompuestos (Fabritius *et al*, 2011). Más tarde, el diagrama de secuencia UML de biosimulación se transliterará en un diagrama de secuencia UML de algoritmo de diseño procedimental como se muestra en la *Figura 2*.


Cuticle formation
Chitin secretion
Chitin hardening
Initiate
Optimum check
Growth
[If Optimum check is 1]
[else]
reinitiate
Closest cuticle
[If closest cuticle is 1]
[else]

1


FEA Shell analysis
Point population
Link generation
Link hardening
Initiate
Assign
• Flesh
• Support
• Loads
FEA
color spectrum for equivalent stress
generate FEA mesh
evaluate equivalent stress
[If equivalent stress > average]
[else]
Populate > average mesh area
Populate < average mesh area
2 closest points
1 closest point
radius > smallest mesh width
radius < smallest mesh width

2

2.1. Bioaprendizaje: biosimulación

Teniendo en cuenta que cada uno de los pasos anteriores ocurre a lo largo de un ciclo de muda, el estudio (exoesqueletos algorítmicos) considera la formación de la cutícula como su primer paso en la generación de un exoesqueleto. Se trata de estructuras diminutas similares a pelos que contienen poros que secretan quitina. Por lo general, se forman de manera circunferencial alrededor del cuerpo del organismo, cubriendo así la carne (Page *et al*, 2007).

Dependiendo de su densidad en la hipodermis (que también determina su proximidad), las cutículas secretan quitina mientras buscan su cutícula vecina más cercana para formar enlaces quitinosos. Estos enlaces se endurecen con el tiempo a medida que se crean y fortalecen enlaces nuevos. Si bien la proximidad de las cutículas refleja la optimización del uso del biomaterial (biointeligencia de la optimización del material), el grosor de los enlaces refleja la resistencia estructural que requiere la hipodermis (dorsal o ventral).

Tras realizar análisis mecánicos en los exoesqueletos de la langosta americana, se ha descubierto que estos enlaces y su endurecimiento reflejan el estrés equivalente global (tanto de tracción como de compresión) sufrido por la hipodermis (Fabritius *et al*, 2011). En otras palabras, la composición estructural anisotrópica de la quitina endurecida secretada por las cutículas es directamente proporcional a la cantidad de estrés equivalente sufrido por la hipodermis o la carne (teniendo en cuenta el panorama más amplio de que la hipodermis contiene los órganos internos). Además, como parte de la biomineralización, el carbonato de calcio presente en el exoesqueleto contribuye a soportar el estrés de compresión mientras que las fibras quitinosas se unen con sus vecinas más cercanas para soportar el estrés de tracción.

Sin embargo, como el exoesqueleto crece superficialmente en el organismo, representa una amenaza de asfixia y restricción de su crecimiento. Por lo tanto, es imperativo que los algoritmos de descomposición estén integrados en la composición genética de los organismos exoesqueléticos (a diferencia de los endoesqueletos que crecen internamente y no asfixian al organismo ni restringen su crecimiento). Por lo tanto, la muda es un paso crucial en el crecimiento, donde se reiteran las necesidades estructurales del organismo en crecimiento y se forman nuevas cutículas en la hipodermis revigorizada. Y todo el proceso se repite una y otra vez.

2.2. Bioaprendizaje: Algoritmos de diseño procedimental

Para la transliteración del exoesqueleto orgánico en un algoritmo de diseño procedimental y demostrarlo como una secuencia UML de algoritmo de diseño procedimental, es necesario primero asignar un organismo que eventualmente desarrollaría un exoesqueleto a su alrededor. Por lo tanto, para el bien de esta investigación y del artículo, consideramos la forma inicial como la carne que eventualmente se comportaría como una hipodermis. En el caso de una polisuperficie, los valores u, v y w determinarían la hipodermis y la población de cutículas. En el caso de una malla (o SubD), las caras de la malla representarían la hipodermis y la población de cutículas.

Antes de rellenar los puntos para representar las cutículas en la hipodermis, la "carne" debe someterse a un análisis de elementos finitos (FEA, por sus siglas en inglés) en el que la polisuperficie, malla o SubD objeto de estudio se someterá a un análisis de concha. En el caso de esta investigación, se utilizó un complemento Grasshopper® Karamba3D 2.2.0 (Preisinger, 2013) para realizar el FEA.
El modelo de análisis de carcasa en Karamba3D pasa por los siguientes pasos para funcionar en la geometría referenciada:

- Asignar la geometría referenciada como una malla (con máximo 25 caras): en el caso de exoesqueletos algorítmicos, esta sería la carne.
- Asignación de un material (selección de una base de datos que contiene 8 materiales distintos): en el caso de los exoesqueletos algorítmicos, el hormigón y sus propiedades estructurales se asignaron a la carne.
- Identificación de las cargas: en el caso de los exoesqueletos algorítmicos, todas las caras de la malla se sometieron a dos fuerzas distintas: A) Gravedad o carga axial que actúa verticalmente hacia abajo sobre todas las caras de la malla. B) Cargas de crecimiento o cargas que actúan normalmente hacia afuera sobre todas las caras de la malla.
- Identificación de los soportes: en el caso de los exoesqueletos algorítmicos, estas serían las partes de la carne que necesitan soporte según el caso de uso del diseño, por ejemplo, joyería, producto y arquitectura.
- Análisis de activos: aquí se analizan todos los activos (la geometría, las cargas y los soportes) para mostrar los resultados.
- Demostración de resultados: en el caso de exoesqueletos algorítmicos, las tensiones equivalentes (en kN /cm^2) se muestran sobre cada vértice de la malla con un gradiente de color que va desde R,G,B – 254,0,73 para el máximo, hasta R,G,B – 138,121,223.

Utilizando el análisis de elementos finitos (FEA) mostrado en la carne con Karamba3D, se genera una población aleatoria de puntos. La generación aleatoria es un intento de emular la aleatoriedad del nacimiento. Una semilla aleatoria dicta qué iteración de la población de puntos se podría utilizar posteriormente para el exoesqueleto, ya que cada semilla ayuda a desarrollar un exoesqueleto distinto para la misma carne. La cantidad de puntos que se llenan en cada iteración es directamente proporcional al área de malla de la carne y al propósito y tipología de la solución de diseño. Este paso coincide con la formación de la cutícula que ocurre en la hipodermis de la carne del crustáceo.
Como respuesta a la secreción de quitina de las cutículas de los exoesqueletos orgánicos para formar enlaces con su cutícula vecina más cercana, se realiza un mapeo de proximidad sobre los puntos que se poblaron en el último paso. El mapeo de proximidad también respeta el área de la malla como se hizo en el paso anterior, buscando n (un número determinado por el diseñador) vecinos más cercanos, dependiendo del propósito y la tipología de la solución de diseño prevista. El mapeo de proximidad se realiza utilizando el componente de red de proximidad que se encuentra en el complemento heteróptera disponible en el repositorio food4rhino. El mapeo de proximidad utiliza el método R-tree (Guttman, 1984). Como paso final, las líneas generadas por la red de proximidad se convierten en SubD mediante el componente Multipipe en Grasshopper® nativo. El espesor del multipipe y, por lo

tanto, la resistencia de la geometría es directamente proporcional al FEA generado durante el primer paso. Aquí, el espesor en milímetros refleja la tensión equivalente expresada en kN/cm^2. El espesor podría tratarse topológicamente para generar apéndices de diseño adicionales según los requisitos de la tipología y las funcionalidades de diseño.

3. Resultados

Como se explicó anteriormente, los resultados de los exoesqueletos algorítmicos se expresan en las siguientes tres etapas:

1. Documentación del bioaprendizaje de exoesqueletos algorítmicos. Esta documentación existe como un algoritmo de diseño procedimental expresado en la interfaz de programación visual Grasshopper®. Sin embargo, la documentación también se muestra en este artículo utilizando un UML.
2. La implementación de los exoesqueletos algorítmicos como un algoritmo de diseño procedimental para diseñar en 3 escalas distintas.
a. Diseño de joyas: diseñar un colgante de collar exoesquelético alrededor de una piedra preciosa esférica.
b. Diseño de producto: diseñar una funda exoesquelética para tazas de café expreso desechables.
c. Diseño arquitectónico: diseñar una fachada exoesquelética para una torre residencial.
3. Utilizar exoesqueletos algorítmicos como ayuda didáctica para enseñar bioaprendizaje, diseño procedimental y arquitectura biodigital.

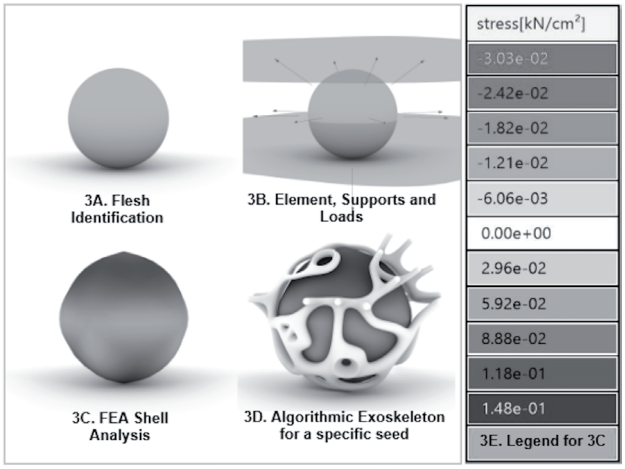
3.1. Documentación del bioaprendizaje

Aunque el exoesqueleto algorítmico está establecido como un algoritmo funcional en el léxico de Grasshopper, es necesario documentarlo para que las pruebas, la corrección de errores, la resolución de problemas y el control de versiones del algoritmo de diseño procedimental se puedan realizar con facilidad y transparencia. Un UML es un sistema de notación simplificado, universal y generalizado para representar gráficamente un pseudocódigo mientras se encuentra en sus etapas de desarrollo.
El UML para exoesqueletos algorítmicos, cuando se muestra junto con el UML para exoesqueletos orgánicos (de crustáceos con exoesqueletos quitinosos biomineralizados), como se muestra en la figura siguiente, brinda transparencia en la génesis del algoritmo. Además, brinda claridad para futuras versiones del algoritmo o el escalamiento requerido para distintas escalas y casos de uso.

3.2. Diseño a través de escalas

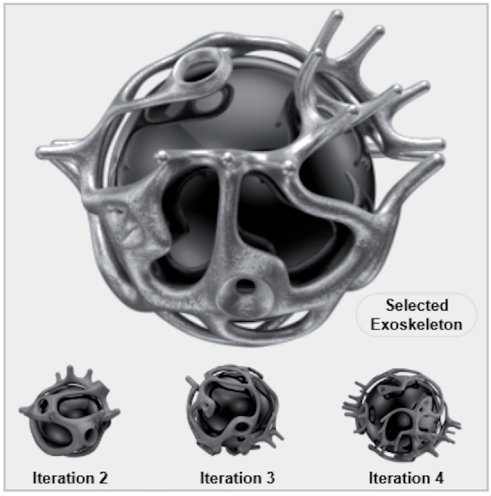
Probar algoritmos de diseño procedimental en distintas escalas y casos de uso sería el siguiente paso lógico que ayudaría a emular los exoesqueletos orgánicos en la industria del diseño. Además, ayudaría a comprender y resolver uno de los mayores desafíos del bioaprendizaje: contrarrestar la ley del cuadrado-cubo (Galileo, 1638). Los siguientes ejemplos ilustran cómo se podrían diseñar exoesqueletos en torno a geometrías (y topologías) complejas mediante la implementación de exoesqueletos algorítmicos.

A. Diseño de joyas: diseñar un colgante de collar exoesquelético alrededor de una piedra preciosa esférica.
Como se muestra en la *Figura 3A*, la piedra preciosa esférica se consideró como la carne que necesitaría el exoesqueleto algorítmico. Para realizar el análisis de elementos finitos, serían necesarias cargas y soportes. Teniendo en cuenta que el colgante se mantendría firme mediante una cuerda a cada lado de la carne esférica, se simuló que las cargas actuarían normalmente hacia afuera de la geometría, como se muestra en la *Figura 3B*. Después de realizar el análisis de elementos finitos, poblar las cutículas y secretar la quitina, como se muestra en la *Figura 3C*, se generaría el exoesqueleto resultante, como se muestra en la *Figura 3D*. La *Figura 3E* ilustra los valores de kN/cm^2 que estarían codificados por colores en la *Figura 3C*.



3

Finalmente, la *Figura 4* demuestra los diferentes exoesqueletos algorítmicos resultantes iterados variando la semilla (para la generación de la cutícula) o variando los soportes (para pasar el hilo del collar).



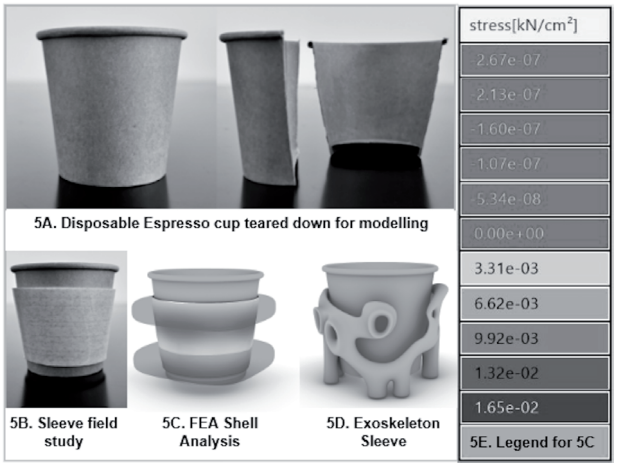
4

B. Diseño de producto: diseñar una funda exoesquelética para tazas de café expreso desechables.

Como se muestra en la *Figura 5A*, se midió y modeló una taza de café expreso desechable existente en Rhino. El problema del diseño fue desarrollar una funda alrededor de la taza para ayudar al usuario a aislar térmicamente sus dedos mientras sostiene la taza.

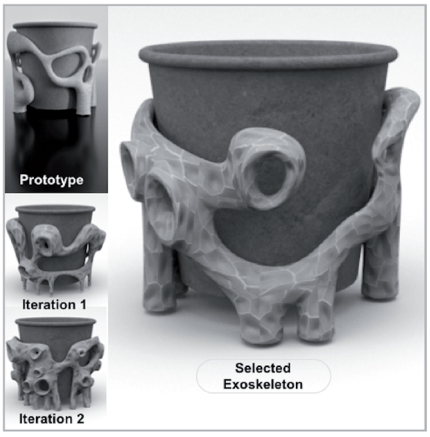
Para comprender la ergonomía de sostener la taza con su peso apropiado, se realizó un estudio de caso en vivo (no computacional) imprimiendo en 3D una funda proxy y sosteniendo una taza llena con ella como se muestra en la *Figura 5B*.

Por lo tanto, para la implementación de un exoesqueleto algorítmico, la manga ficticia se consideró como una carne. Los puntos de contacto probables tomados del estudio de caso en vivo se consideraron como los soportes. Y se simuló que las cargas actuaban normalmente hacia afuera de la geometría, como se muestra en la *Figura 5C*. Después de realizar el análisis de elementos finitos, generaríamos el exoesqueleto resultante como se muestra en la *Figura 5D*. La *Figura 5E* ilustra los valores de kN/cm^2 que estarían codificados por colores en la *Figura 5C*.



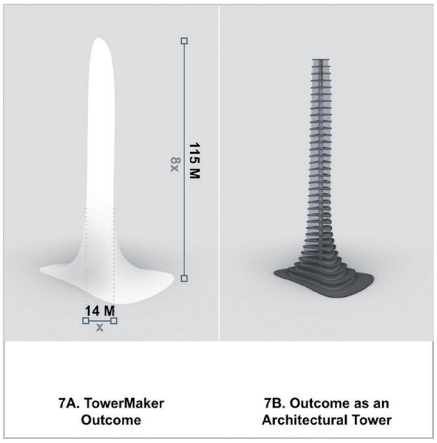
5

Finalmente, la *Figura 6* demuestra los diferentes exoesqueletos algorítmicos resultantes iterados variando la semilla (para la generación de la cutícula) o variando los soportes (para sostener la manga en 2 puntos de contacto diferentes).



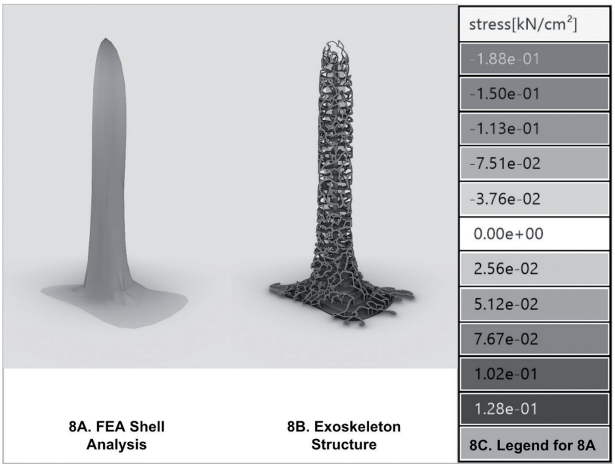
6

C. Diseño arquitectónico: diseñar una fachada exoesquelética para una torre residencial. Como se muestra en la *Figura 7A*, el problema de diseño arquitectónico implicó diseñar una torre biodigital que mide 115 m de alto con una relación de circunferencia a altura de 1:8. Muestra el resultado del algoritmo TowerMaker que se implementó para realizar esta tarea iterando a través de numerosas posibilidades de una forma similar a una torre mediante el control de la escala, el movimiento y la rotación de las curvas iniciales. La *Figura 7B* demuestra cómo la forma generada utilizando TowerMaker se reutilizó en una torre arquitectónica al tratarla como un edificio de núcleo y carcasa típico. El núcleo tiene 3 ascensores y 2 pozos de servicio. Hay 34 losas de piso con su acristalamiento estructural independiente como se muestra en la figura.



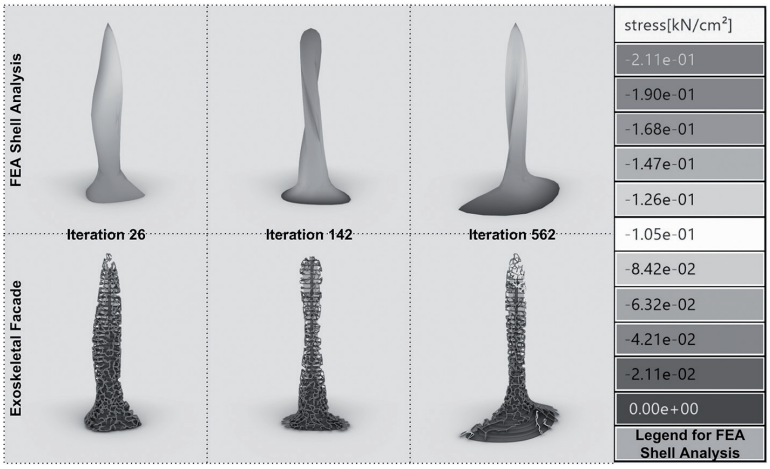
7

La *Figura 8A* muestra cómo la posible torre generada por el algoritmo TowerMaker se ha considerado como la carne de la fachada del exoesqueleto para sostener la torre. La *Figura 8A* también muestra cómo la base de la torre se considera como el soporte. Y se simuló que las cargas actuaban normalmente hacia afuera de la geometría con el análisis de la carcasa FEA ilustrado en la forma generada en la *Figura 7A*. Después de realizar el FEA, poblar las cutículas y secretar la quitina como se muestra en la *Figura 8A*, se generaría el exoesqueleto resultante como se muestra en la *Figura 8B*. La *Figura 8C* ilustra los valores de kN/cm^2 que estarían codificados por colores en la figura 8A.



8

Finalmente, la *Figura 9* demuestra los diferentes exoesqueletos algorítmicos resultantes iterados variando la semilla (para la generación de la cutícula) o variando la torre inicial (seleccionando diferentes iteraciones de TowerMaker).



9

3.3. Aplicación pedagógica

El tema de la torre biodigital presentada aquí tiene su origen en el proyecto arquitectónico de Alberto T. Estévez llamado *Barcelona Door of Europe Project* (2008-actualidad), en pos de una real ecología integral. Lo mostrado en estos párrafos es la aplicación de tal idea en el Máster de Arquitectura Biodigital que él mismo dirige en la UIC Barcelona. Así pues, se trata de que los estudiantes diseñen torres residenciales de programas complejos y completos (en relación a cumplimentar los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas, que concretan la idea de ecología integral), en el frente marítimo de Barcelona. Entonces, a los estudiantes se les asignan islas de 115 m x 115 m en la costa de Barcelona, donde las torres deben tener una altura de 115 m.

Los estudiantes seguirán el siguiente proceso:
1. Recopilación de 100 imágenes de naturaleza biológica.
2. Realizar 20 bocetos de torres biodigitales utilizando la inspiración de diseño del paso 1.
3. Desarrollar 5 modelos de torres biodigitales utilizando las torres biodigitales del paso 2.
4. Diseño de una torre biodigital combinando las estrategias implementadas en el paso 3.
En los dos últimos años este proceso, inicialmente de abocetado sólo manual, se ha enriquecido con además la aplicación también en esos pasos de las visualizaciones que la Inteligencia Artificial puede ofrecer.

El proyecto es una ejecución empírica del proceso de bioaprendizaje. Y también avanza hacia la incorporación del bioaprendizaje en un flujo de trabajo de diseño arquitectónico, al trabajar con el ADN como si fuera un "software natural", y como su símil silogístico en el ámbito digital, trabajando con el software como si fuera un "ADN digital" (Estévez, 2009). Además, el proyecto sirve como modelo empírico para demostrar la implementación funcional de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. Se anima y capacita a los estudiantes para que resuelvan los 17 problemas y oportunidades postulados por los ODS de la ONU mediante la propuesta de programas funcionales y políticas, el uso de metodologías de construcción, el uso de biomateriales y, sobre todo, el entendimiento de la arquitectura biodigital como herramienta principal para el diseño.
En el paso 3 (desarrollo de 5 modelos de torres biodigitales), tal como se destacó anteriormente, los estudiantes implementan varias estrategias algorítmicas y naturales para cumplir con sus objetivos de diseño (establecidos por los 17 ODS). Aquí, los exoesqueletos algorítmicos sirven como un instrumento importante para brindar soporte estructural a las torres biodigitales. Los exoesqueletos algorítmicos tienen una posibilidad única de brindar un soporte implacable e impecable para cualquier forma amorfa. Además, la apertura estructural del algoritmo ayuda a servir como un sistema de fachada fluida al mismo tiempo. La *Figura 10* ilustra tres proyectos de tres estudiantes que han implementado exoesqueletos algorítmicos en sus proyectos de torres biodigitales en proporciones variadas. La *Figura 10A* ilustra el proyecto Porifera de Emad Zakerian. En su proyecto, Emad usa los exoesqueletos algorítmicos para soportar y proteger la torre como un sistema anidado dual que exhibe fractalidad dentro de los exoesqueletos (siendo la fractalidad un concepto bioaprendido que se enseña a los estudiantes para su implementación en el proyecto). Un