

Fabricación de exoesqueletos algorítmicos: aprovechamiento de la integridad estructural de los exoesqueletos para optimizar los ciclos de fabricación

Angad Warang y Alberto T. Estévez⁽¹⁾

iBAG-UIC Barcelona (Institute for Biodigital
Architecture and Genetics)

Universitat Internacional de Catalunya

Resumen: Los exoesqueletos algorítmicos son algoritmos de biosimulación implementados en un marco de diseño procedimental para extraer la integridad estructural anisotrópica presente en exoesqueletos orgánicos. Los exoesqueletos algorítmicos se han empleado previamente para generar soluciones de diseño iterativas en diversas escalas. Este artículo profundiza en la investigación mediante el desarrollo de estrategias de fabricación que aprovechan la integridad estructural presente en la morfología de los exoesqueletos orgánicos para optimizar parámetros clave de fabricación. El artículo utiliza dos estrategias de fabricación discretas: impresión FDM con termoplásticos y ensamblaje de segmentación de franjas con láminas. Ambas estrategias se ilustran mediante los siguientes tres pasos: primero, identificar la escala, el caso de uso y el contexto para configurar un exoesqueleto algorítmico; segundo, generar resultados de diseño iterativos para optimizar el tiempo de fabricación, el uso de materiales y la complejidad de la forma dentro de las plataformas de diseño y modelado de Rhinoceros® y Grasshopper®; y tercero, ilustrar las etapas de las dos estrategias de fabricación mencionadas, sus limitaciones, desafíos y tolerancias. Los resultados presentados en este artículo demuestran una metodología clara y coherente para desarrollar un proceso de fabricación y construcción de algoritmos de diseño procedimental que podrían utilizarse en la industria del diseño. Además de demostrar la escalabilidad de los exoesqueletos algorítmicos, el artículo también explica cómo el flujo de trabajo de bioaprendizaje podría utilizarse como mecanismo instructivo.

Palabras clave: Arquitectura biodigital - Diseño procedimental - Fabricación digital - Ensamblaje de segmentación de rayas - Impresión FDM

[Resúmenes en inglés y en portugués en las páginas 58-59]

⁽¹⁾ Ver CVs en págs. 59-60

1. Introducción

Los exoesqueletos orgánicos son integumentos endurecidos formados por la deposición combinatoria metabólica de vidrio de sílice, carbonato de calcio, quitina, celulosa o queratina (Muzzarelli, 2010). Si bien proporcionan estabilidad estructural, los exoesqueletos también tienen aberturas, que tienen inmensas similitudes con elementos de envolventes de edificios como paredes, techos, marquesinas, ventanas y fachadas. Por lo tanto, un estudio de su morfología y la transliteración de este estudio en forma de algoritmos de diseño procedimental –a saber, los exoesqueletos algorítmicos (algoritmos de diseño que son paramétricos, iterativos y recursivos)– han sido una adición significativa al inventario de diseño de arquitectos, diseñadores de productos, diseñadores de joyas y diseñadores de muebles (Warang y Estévez, 2025). Este documento proporciona ejemplos empíricos en la realización continua de la investigación sobre exoesqueletos algorítmicos. El artículo ayuda a ilustrar 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 crear prototipos y, eventualmente, fabricar el diseño exoesqueleto de un casco de bicicleta utilizando software de diseño computacional, software de corte FDM y herramientas de fabricación FDM.

1.1. Exoesqueletos algorítmicos

Los exoesqueletos de los artrópodos, compuestos principalmente de quitina, consisten en elementos esqueléticos cuyas propiedades físicas están específicamente adaptadas para satisfacer las necesidades funcionales y ecofisiológicas del organismo (Fabritius *et al.*, 2011). Si bien se ha investigado extensamente la modelización de la morfología de los exoesqueletos, principalmente para fabricarlos utilizando azúcares y proteínas, y en ocasiones incluso quitina (Karimipour *et al.*, 2021), no existen algoritmos definitivos de diseño procedimental para generar computacional e industrialmente exoesqueletos que puedan servir tanto como estructura como piel.

Los exoesqueletos algorítmicos sirven, por lo tanto, como una línea de investigación que establece la necesidad teórica de dicho algoritmo en el inventario de diseño de un arquitecto biodigital y, posteriormente, procede a desarrollar dicho algoritmo mediante la implementación de modelos y algoritmos de biosimulación existentes en la interfaz y el entorno de software de modelado computacional como Rhinoceros® (McNeel, 2024) y software de programación visual como Grasshopper®. Siguiendo los pasos previos de esta investigación, en el artículo anterior titulado “Exoesqueletos algorítmicos: Extracción de biointeligencia de exoesqueletos orgánicos encontrados en la naturaleza para desarrollar algoritmos de diseño procedimental” (Warang y Estévez, 2025), los autores demostraron la siguiente metodología para establecer un exoesqueleto algorítmico:

a. Transcripción: la documentación de la transcripción de exoesqueletos algorítmicos a partir de modelos de simulación biológica mediante el uso de diagramas UML dentro de las plataformas de diseño y modelado de Rhinoceros® y Grasshopper®.

b. Aplicaciones: la ilustración de resultados iterativos generados mediante la implementación de exoesqueletos algorítmicos en tres escalas distintas, joyería, diseño de productos y arquitectura.

c. Edificación: aplicación pedagógica de exoesqueletos algorítmicos que enseña a los aspirantes a arquitectos biodigitales cómo extraer biointeligencia, bioaprendizaje e implementar algoritmos de diseño procedimental en sus flujos de trabajo.

Los resultados del artículo mencionado demostraron una metodología coherente para la transcripción de modelos de biosimulación existentes relativos a la creación, descomposición y mantenimiento de exoesqueletos orgánicos en algoritmos de diseño procedimental que podrían utilizarse en la industria del diseño para el modelado y el análisis. La implementación de algoritmos de diseño procedimental en diferentes escalas y las iteraciones generadas (como se ilustra en el paso 2. Aplicaciones) demostraron que la escala de la tipología de diseño no limita la implementación de exoesqueletos algorítmicos. El artículo también explicó cómo el flujo de trabajo de bioaprendizaje podría utilizarse como mecanismo instructivo, especialmente en el entorno educativo de la arquitectura biodigital.

1.2. Conclusiones clave de la transcripción de exoesqueletos algorítmicos

La calidad morfológica de los exoesqueletos quitinosos debe su configuración indiscriminada a su crecimiento y descomposición anisotrópica que es consecuencia de la deposición mineral (generalmente carbonato de calcio). Dentro de sus fibras, la composición de quitina, calcita y proteínas también desarrolla, en consecuencia, orientaciones cristalográficas pronunciadas, lo que resulta en propiedades mecánicas anisotrópicas direccionales (Raue *et al.*, 2010).

Tras realizar análisis mecánicos en los exoesqueletos de la langosta americana, se ha descubierto que estos enlaces y su endurecimiento reflejan la tensión equivalente global (tanto de tracción como de compresión) sufrida 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 tensión equivalente sufrida por la hipodermis o la carne (teniendo en cuenta el panorama general 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 la tensión de compresión, mientras que las fibras quitinosas se unen con sus vecinas más cercanas para soportar la tensión de tracción (Warang y Estévez, 2025). Sin embargo, el crecimiento y la descomposición (la langosta americana, al igual que otros crustáceos, experimenta ciclos de muda a lo largo de su vida) es un proceso constante, provocado por el cuerpo del organismo, siguiendo la regulación de las proteínas mientras descifra su propio ADN. El proceso completo de un exoesqueleto anisotrópico quitinoso orgánico y su recursión a lo largo de su vida es uno de los ejemplos más canónicos de autopoiesis (Maturana y Varela, 1972).

El exoesqueleto algorítmico, por otro lado, puede aproximarse a proporcionar un equivalente computacional al código que genera, desintegra y repara la forma (es decir, el ADN), pero no puede crear la forma por sí mismo sin un sistema externo. El sistema procedimen-

tal empleado en este caso requerirá un sistema externo de fabricación para construir el exoesqueleto algorítmico, ya que no puede hacerlo por sí mismo. Por lo tanto, el exoesqueleto algorítmico tendría que ser un sistema procedimental alopoiético (como cualquier otro ciclo de producción o fabricación).

En segundo lugar, un exoesqueleto anisotrópico quitinoso orgánico debido a su naturaleza autopiética, desarrolla su exoesqueleto en una dirección mecánicamente hacia afuera (perpendicular a su epidermis). De hecho, la existencia misma de las cutículas como medio para transportar quitina a la epidermis es suficiente evidencia de cómo el crecimiento, la descomposición y su recursión siempre ocurren perpendiculares a la epidermis (Shiyun *et al.*, 2024). Sin embargo, en el caso del exoesqueleto algorítmico, su sistema de procedimiento alopoiético posterior tendrá una dirección de fabricación distinta y específica para cada caso, que sería totalmente diferente de la dirección de su aplicación, descomposición y operación. La dirección de fabricación, por ejemplo, dependería del método de fabricación elegido. Si el producto final (independientemente de su escala y tipología) requiere múltiples métodos de fabricación, el producto tendría múltiples métodos de fabricación que se diferenciarían aún más de la dirección de su aplicación, descomposición y operación. Y así, además de comprender y establecer el material elegido para realizar el diseño, la escala y tipología del producto deseado influirán en gran medida en la dirección de la fabricación y la dirección posterior de la aplicación, deterioro y funcionamiento del producto deseado.

1.3. Conclusiones clave de las aplicaciones de los exoesqueletos algorítmicos

En el artículo anterior sobre exoesqueletos algorítmicos titulado “Exoesqueletos algorítmicos: Extracción de biointeligencia de exoesqueletos orgánicos encontrados en la naturaleza para desarrollar algoritmos de diseño procedimental” (Warang y Estévez, 2025), los autores ilustraron la implementación de exoesqueletos algorítmicos como un algoritmo de diseño procedimental para diseñar en 3 escalas distintas.

- a. **Joyas:** diseñar un colgante de collar exoesquelético alrededor de una piedra preciosa esférica.
- b. **Producto:** diseñar una funda exoesquelética para tazas de café expreso desechables.
- c. **Arquitectura:** diseñar una fachada exoesquelética para una torre residencial.

Considerando que la fabricación de un exoesqueleto algorítmico, su dirección de fabricación y el material elegido dependen en gran medida de la escala y la tipología del producto previsto, este paso (elegir la escala y la tipología del diseño previsto) cobra suma importancia para este artículo y la investigación en general. Dado que la fabricación de exoesqueletos algorítmicos (el título de este artículo) explora las capacidades alopoiéticas de un algoritmo de diseño procedimental, sería razonablemente prudente mejorar y ampliar ciertos parámetros de fabricación que se verían directamente afectados por dicho algoritmo. Los parámetros exactos afectados por los exoesqueletos algorítmicos pueden así seleccionarse y optimizarse secuencialmente aprovechando la integridad estructural del exoes-

queleto anisotrópico quitinoso orgánico. Además, el hecho mismo de que el comportamiento anisotrópico de los exoesqueletos se derive de su composición de materiales biocompuestos (Romano *et al.*, 2007) aumenta su similitud con la estructura multimaterial de los exoesqueletos algorítmicos, pero ahí es donde la similitud desaparece.

Si bien la escala del diseño arquitectónico plantea un potencial inmenso para explorar características y componentes arquitectónicos distintivos bajo el envoltorio morfológico y estructural (el hecho de que es una piel y una estructura) de un exoesqueleto, la mera escala de los materiales requeridos y sus sistemas de fabricación posteriores potencialmente plantearían desafíos en términos de la viabilidad financiera de este experimento.

Por otra parte, la escala de diseño de joyas (ilustrada empíricamente como un medio para realizar un exoesqueleto algorítmico), aunque financiera y estructuralmente viable, carece de la complejidad de los casos de uso, los distintos materiales utilizados, los sistemas de fabricación empleados y, sobre todo, el análisis y los precedentes ergonómicos (diseño para el cuerpo humano).

1.4. Conclusiones clave de la construcción de exoesqueletos algorítmicos

El proyecto de la torre biodigital es una ejecución empírica del proceso de bioaprendizaje (Estévez, 2023). El proyecto también avanza hacia la incorporación del bioaprendizaje en un flujo de trabajo de diseño arquitectónico, trabajando con el ADN como si fuera “software natural”, y, como su símil silogístico en el ámbito digital, trabajando con el software como si fuera “ADN digital” (Estévez, 2009).

Como describen los autores en el mencionado artículo (Warang y Estévez, 2025), varios estudiantes del Máster en Arquitectura Biodigital han empleado exoesqueletos algorítmicos en sus proyectos de torres biodigitales en diversas proporciones. Se ha destacado de forma muy clara y exhaustiva cómo los exoesqueletos algorítmicos han servido como un instrumento importante para proporcionar soporte estructural a las torres biodigitales. Además del hecho de que los exoesqueletos algorítmicos tienen una posibilidad única de proporcionar un soporte implacable e impecable para cualquier forma amorfa, la apertura estructural del algoritmo ayuda a servir como un sistema de fachada fluida al mismo tiempo.

Siguiendo las conclusiones de las aplicaciones de los exoesqueletos algorítmicos (discutidas en el apartado 1.3), la escala del diseño arquitectónico dificulta la ejecución de la investigación en términos de viabilidad financiera, añadiendo así un parámetro clave en los ciclos de fabricación: el dinero. Además, el Biodigital Architecture Studio (donde los estudiantes del Máster en Arquitectura Biodigital diseñan computacionalmente y prototipan digitalmente las torres biodigitales) ha proporcionado algunas lecciones clave sobre la fabricación de prototipos a escala para varios de estos proyectos, anticipando así la complejidad de la fabricación de exoesqueletos algorítmicos a escala real.

Tal como se describe en el proceso de realización de torres biodigitales, los estudiantes siguen los siguientes pasos:

a. Recopilan primero **100 imágenes** de seres y/o elementos biológicos, que servirán para un primer bioaprendizaje e inspiración, implementando luego el diseño orgánico digital.

- b.** Realizan después **20 bocetos** de torres biodigitales utilizando el bioaprendizaje y la inspiración de diseño del paso 1.
- c.** Desarrollan finalmente **5 modelos** de torres biodigitales utilizando las conclusiones sacadas en el paso 2.
- d.** Y acaban con un diseño de **una torre biodigital** seleccionada mediante la combinación de estrategias implementadas en el paso 3.
- e.** Todo concluye con el **prototipado** de la **torre biodigital** diseñada en el paso 4 mediante la implementación de herramientas de fabricación digital disponibles en el Institute for BioDigital Architecture & Genetics-Universitat Internacional de Catalunya (iBAG-UIC Barcelona).

Así, en el paso 5 los estudiantes implementan la fabricación aditiva con impresión 3D mediante una impresora cartesiana FDM. El material elegido es filamento PLA (ácido poliláctico, un bioplástico), compatible con la marca y el diámetro de la boquilla de las impresoras FDM disponibles en la Universidad. La escala elegida para los prototipos fue 1:500. Se observó que los estudiantes que implementaron exoesqueletos algorítmicos en sus diseños en el paso 4 experimentaron que sus impresiones requirieron poco o ningún soporte adicional para sus prototipos. Esto redujo considerablemente el tiempo de impresión, el material requerido y el posprocesamiento necesario para que la impresión se considerara un prototipo válido a escala 1:500. Considerando que los exoesqueletos algorítmicos representaban estructuras de fachada (en la mayoría de los casos), los elementos estructurales, que medían aproximadamente 100 cm a escala real, tendrían un grosor de 2 mm en el prototipo.

Por lo tanto, si el prototipo puede salvar voladizos con tramos de 2 mm de espesor, sin necesidad de soportes, la fabricación del producto previsto podría incluir elementos de diseño con un espesor mínimo de 2 mm. Por lo tanto, las conclusiones de las aplicaciones y la construcción de exoesqueletos algorítmicos (descritas en los puntos 1.3 y 1.4) ayudan a comprender que la escala de diseño del producto podría ser ideal para la fabricación de exoesqueletos algorítmicos.

2. Metodología

Como se describió anteriormente, la metodología se centra principalmente en impulsar la investigación sobre exoesqueletos algorítmicos mediante el desarrollo de estrategias de fabricación que aprovechen la integridad estructural presente en la morfología de los exoesqueletos orgánicos para optimizar los parámetros clave de fabricación. Por lo tanto, la metodología documenta el proceso que sigue los siguientes pasos:

Selección

- a.** Identificar la escala, el caso de uso y el contexto para configurar el exoesqueleto algorítmico, para luego ser fabricado utilizando 2 estrategias de fabricación: impresión FDM con termoplásticos y ensamblaje por segmentación en franjas, con láminas.

- b.** Establecer un exoesqueleto algorítmico computacionalmente en la plataforma de Rhinoceros® y Grasshopper®, pero documentándolo en este artículo mediante un diagrama de secuencia UML de biosimulación (versión 2.5.1) (OMG, 2017).
- c.** Desarrollar iteraciones básicas para seleccionar el diseño según la idoneidad del caso de uso y el contexto.

Mejoramiento

- a.** Iterar a través de los resultados del diseño para optimizar el tiempo de fabricación, el uso del material y la complejidad de la forma dentro de las plataformas de diseño y modelado de Rhinoceros® y Grasshopper®.
- b.** Generación de código G para las trayectorias de herramientas de la impresora FDM con Ultimaker Cura (versión 5.10.0 para Mac) (Ultimaker BV, 2023).
- c.** Realizar pruebas para investigar y verificar la validez de los cambios realizados dentro de la configuración de generación de código G.

Observaciones

- a.** Ilustrando las etapas de las estrategias de fabricación.
- b.** Destacando las limitaciones, desafíos y tolerancias de las estrategias de fabricación.

2.1. Selección

Siguiendo las conclusiones de la introducción de este artículo, especialmente las conclusiones derivadas de las aplicaciones y el desarrollo de los exoesqueletos algorítmicos (descritas en los apartados 1.3 y 1.4), la escala de diseño del producto es la opción más prudente para el desarrollo del exoesqueleto algorítmico. Además de ser extremadamente funcional a escala ergonómica, el prototipado (idealmente a escala 1:25) a esta escala de diseño también proporcionaría pruebas útiles y reveladoras para la fabricación de un producto a escala real.

2.1.1. Selección (identificar contexto)

Para identificar un objeto funcional que considere los análisis ergonómicos al trabajar con el cuerpo humano, un producto de uso portátil, *wearable*, sería la opción más prudente. Considerando todos los parámetros de selección, el objetivo de diseño previsto tendría los siguientes parámetros:

- Tipología: producto de uso portátil, *wearable*.
- Función: casco.
- Talla: adulto (unisex).
- Contexto: ciclismo (uso urbano).
- Material: compuesto.

Así, el objetivo de diseño pretendido sería un **casco de bicicleta para adultos** de uso urbano fabricado con materiales compuestos.

Para comenzar a implementar los exoesqueletos algorítmicos, el diseño requiere un análisis ergonómico de la cabeza que se utilizará para acomodar el diseño del casco exoesquelético. Para evitar pasos adicionales que podrían implicar el escaneo fotogramétrico de una cabeza humana con Agisoft Metashape (Agisoft, 2024), por ejemplo del autor, se descargó y utilizó un archivo 3D disponible en una base de datos de modelos 3D en internet: MakerWorld.com. En este caso, se utilizó el modelo que se muestra en la *Figura 1*.

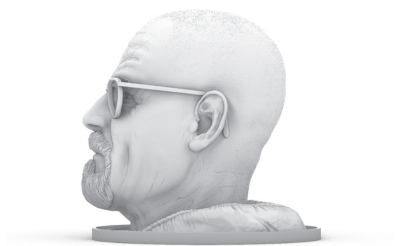


Figura 1. Vista lateral izquierda del modelo 3D: busto de Walter White [modelo 3D], creado por el usuario fuzzy, 2024.

El uso de un modelo 3D existente de una cabeza humana no solo es esencial para evitar un paso innecesario (la fotogrametría), sino que también proporciona una base directa para probar y evaluar el prototipo en etapas posteriores. Además, la calvicie de la cabeza (de Walter White) permite un escaneo fluido e ininterrumpido de la morfología de la cabeza, a la vez que mejora la precisión del resultado esperado con el cuerpo humano.

2.1.2. Selección (Establecimiento del exoesqueleto algorítmico)

Una vez importado el modelo a los entornos de Rhinoceros® y Grasshopper®, se estableció la definición inicial del exoesqueleto algorítmico. El diseño procedural completo se mantiene en la versión canónica, como se ilustra en el artículo anteriormente mencionado (Warang y Estévez, 2025). La *Figura 2*, a continuación, muestra un diagrama de secuencia UML del exoesqueleto algorítmico canónico.

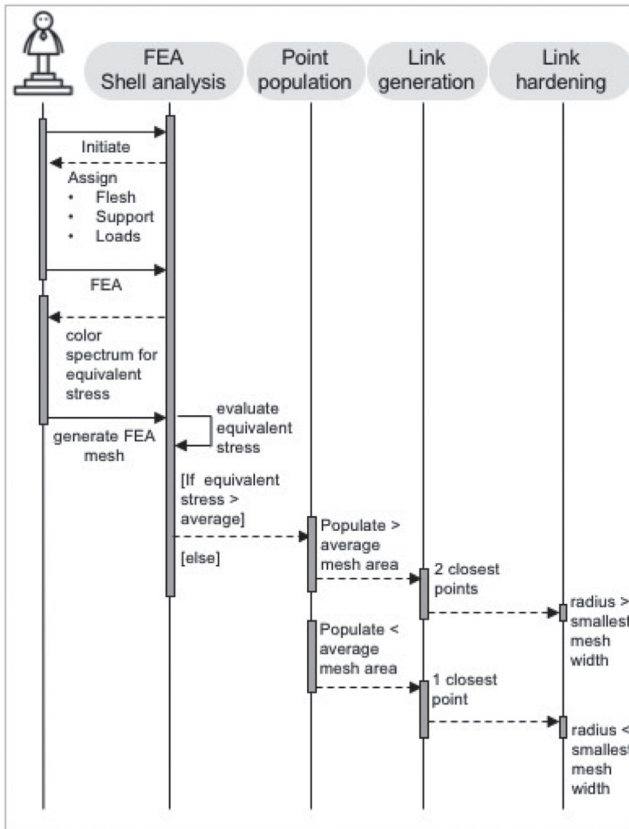


Figura 2. Diagrama de secuencia UML del algoritmo de diseño procedimental de exoesqueletos algorítmicos que crecen alrededor de la geometría deseada (Fuente: Autores, 2025).

En el caso de este artículo, el algoritmo de diseño procedimental, a efectos prácticos, se denominará casco exoesquelético. Como se muestra en la *Figura 2*, el casco exoesquelético requiere que el usuario asigne tres variables para iniciar el algoritmo. La asignación se realizó de la siguiente manera:

- Carne: la parte de la cabeza que necesita protección. Esta parte se llama cuero cabelludo y se muestra en la *Figura 3A*.
- Soporte: la parte del cuero cabelludo que se sostendrá. Esta parte se denominará orejas y se muestra en la *Figura 3B*.
- Cargas: las cargas de impacto que podrían dañar el cuero cabelludo. Estas serían todas las cargas internas normales sobre el cuero cabelludo, como se muestra en la *Figura 3C*.

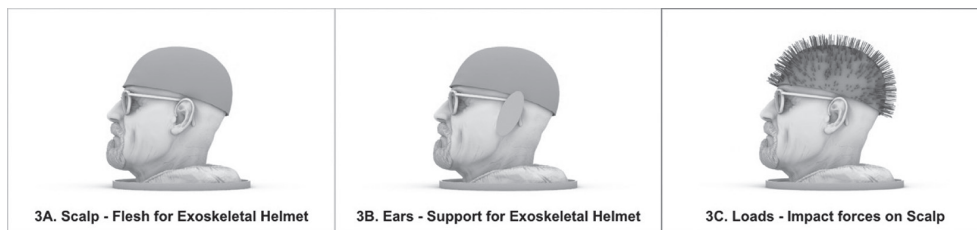


Figura 3. Las figuras muestran las variables asignadas a la geometría del exoesqueleto algorítmico para el diseño de un casco exoesquelético (Fuente: Autores, 2025).

Como se muestra en la *Figura 2*, el algoritmo de diseño procedural iniciado (el casco exoesquelético) se sometió a un análisis de elementos finitos (FEA), donde el cuero cabelludo (que en este caso es una malla de alta resolución compuesta por 430.784 caras) se sometió a un análisis de carcasa. En el caso del casco exoesquelético (al igual que el exoesqueleto algorítmico canónico), se utilizó el plugin Karamba3D 2.2.0 de Grasshopper® (Preisinger, 2013) para realizar el FEA.

El modelo de análisis de carcasa en Karamba3D pasó por los siguientes pasos para funcionar en la geometría del cuero cabelludo referenciada como se muestra en la *Figura 3*:

- Asignar la geometría referenciada como una malla (con máximo 25 caras): en el caso del casco exoesquelético, esta era el cuero cabelludo.
- Asignación de un material (eligiendo de una base de datos que contiene 8 materiales distintos): en el caso del casco exoesquelético se asignó a la carne un plástico de alta resistencia y sus propiedades estructurales.
- Identificación de las cargas: en el caso del casco exoesquelético todas las caras de la malla fueron sometidas a cargas de impacto que actuaban normalmente hacia afuera sobre todas las caras de la malla, como se muestra en la *Figura 3C*.
- Identificación de los soportes: en el caso del casco exoesquelético se consideraron las orejas como soportes, ya que sería necesario agregar correas posteriormente al producto fabricado para sujetarlo de forma segura mientras se conduce una bicicleta, como se muestra en la *Figura 3B*.
- Analizando los activos: se analizaron todos los activos, el cuero cabelludo, las cargas y las orejas, para mostrar los resultados.
- Resultados: en el caso del casco exoesquelético las tensiones equivalentes (en kN/cm^2) se mostraron 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 para el mínimo.

El análisis de la carcasa FEA resultante que actúa sobre el cuero cabelludo mientras las cargas de impacto actúan sobre él se ilustra en la *Figura 4*. La imagen muestra el espectro

de tensión que actúa a través de su dominio topológico. Como se muestra en la *Figura 3*, la asignación de carga considera una aproximación aleatoria de todas las posibles cargas normales que actúan sobre el cuero cabelludo. Este paso permite una dispersión de los puntos de tensión a lo largo del dominio topológico del cuero cabelludo. Si la aproximación aleatoria cambia, el análisis de la carcasa FEM cambiaría todo el análisis, afectando así la distribución de los puntos de tensión y, en consecuencia, el casco exoesquelético resultante. Esta generación anisotrópica de puntos de tensión en una parte del cuerpo bastante simétrica, como la cabeza, mientras se diseña un dispositivo portátil que ayuda y protege el movimiento hacia adelante, es la representación misma de las propiedades mecánicas de la anisotropía de los exoesqueletos (Zhifei y Ling, 2023).



Figura 4. Se muestra el análisis FEA visualizado en el cuero cabelludo del sujeto de prueba para el diseño de un casco exoesquelético (Fuente: Autores, 2025).

2.1.3. Selección (Exportación de resultados)

Después de algunas pruebas del exoesqueleto algorítmico como casco exoesquelético, se exportaron algunos resultados como se muestra en la *Figura 5*.

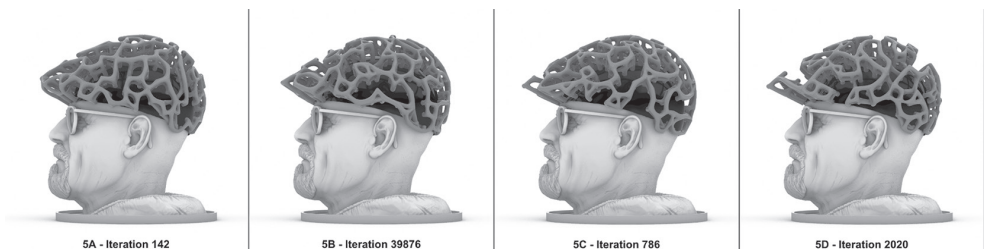


Figura 5. La figura muestra cuatro posibles cascos exoesqueléticos (Fuente: Autores, 2025).

Los cuatro posibles cascos exoesqueléticos ilustrados en la *Figura 5* muestran las siguientes características que podrían ayudar al diseño para su caso de uso y contexto.

- a. Iteración 142: muestra una matriz enjaulada de puntos de tensión a lo largo del dominio topológico, lo que genera una capa más fuerte, pero muchas líneas redundantes, que podrían aumentar el tiempo y el peso de la impresión.
- b. Iteración 39876: muestra una matriz enjaulada con un frente puntiagudo que tiene una matriz de puntos similar a la iteración 142, sin embargo, algunos puntos están demasiado cerca o demasiado lejos, lo que genera una inconsistencia en los tramos, y, por lo tanto, agrega potencialmente soportes redundantes a la impresión.
- c. Iteración 786: muestra una matriz uniforme que tiene una cantidad aceptable de puntos de tensión en todo el dominio topológico y al mismo tiempo tiene un frente puntiagudo que podría ayudar en el movimiento dinámico del ciclista.
- d. Iteración 2020: Presenta una matriz equilibrada de puntos de tensión con numerosos espacios vacíos que no requieren redundancia generada por tramos. Además, la forma mantiene la aerodinámica esperada de un producto portátil.

2.2. Mejoramiento

Después de generar las iteraciones, el exoesqueleto algorítmico establecido se sometió a algunas pruebas de impresión 3D que podrían ayudar a los autores a determinar los desafíos que podrían surgir con la morfología de tratar con un exoesqueleto mientras se realiza la fabricación aditiva FDM a una determinada escala.

Se hicieron las siguientes suposiciones para la etapa de creación de prototipos antes de iniciar el proceso de optimización:

- Método de prototipado: impresora 3D FDM.
- Hardware seleccionado: impresora Felix Tec 4 (FELIXprinters, 2018).
- Software de corte seleccionado: Ultimaker Cura (versión 5.10.0 para Mac) (Ultimaker BV, 2023).
- Filamento seleccionado: PLA-filamento “traffic white” (Fillamentum Manufacturing Czech s.r.o., 2024).
- Escala seleccionada del prototipo: 1:25.
- Adherencia de la placa de construcción: soporte de borde con un máximo de 10 desplazamientos.
- Estructura de soporte: ninguna.
- Relleno: 5%. Estructura giroide.
- Configuración de la carcasa: 4 paredes.
- Velocidad de impresión: 50%.

Como se entiende, las configuraciones anteriores sólo son válidas para la etapa de prototipado que se ha considerado para probar y validar las configuraciones de generación de código G que invariablemente afectarán la optimización de los ciclos de fabricación. Se

imprimió un modelo a escala del busto de Walter White (como se muestra en las imágenes de arriba) para mantener un lienzo firme para las iteraciones e interpolaciones.

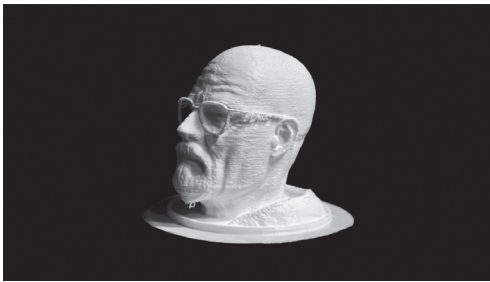


Figura 6. Se muestra un prototipo a escala impreso en 3D del modelo 3D: busto de Walter White. Escala 1:25 (Fuente: Autores, 2025).

2.2.1. Optimización (iteración para la fabricación)

Considerando todas las suposiciones anteriores, los cuatro posibles cascos exoesqueléticos mostrados en la *Figura 5* se cortaron con la misma configuración, perfiles y computadora. La *Figura 7* muestra los resultados.

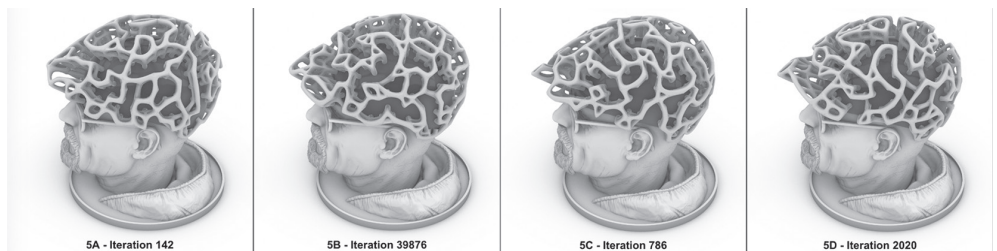


Figura 7. Se muestra cuatro posibles cascos exoesqueléticos (Fuente: Autores, 2025).

Los 4 posibles cascos exoesqueléticos ilustrados en la *Figura 7* muestran los resultados de los perfiles de corte y los tiempos de impresión que mostró el motor de corte: Ultimaker Cura.

- a. Iteración 142 -
 - i. Tiempo - 3 horas 28 minutos.
 - ii. Material - 8 gramos.
- b. Iteración 39876 -
 - i. Tiempo - 3 horas 16 minutos.
 - ii. Material - 7,8 gramos.
- c. Iteración 786 -
 - i. Tiempo - 2 horas 57 minutos.
 - ii. Material - 8,2 gramos.
- d. Iteración 2020 -
 - i. Tiempo - 2 horas 48 minutos.
 - ii. Material - 7,4 gramos.

2.2.2. Optimización (generación de código G)

Considerando todos los resultados anteriores, se preparó la iteración 2020 para la verificación y evaluación. Esta iteración se cortó con los mismos perfiles; sin embargo, se probaron algunas orientaciones para optimizar el tiempo total de impresión. La *Figura 8* muestra los resultados.

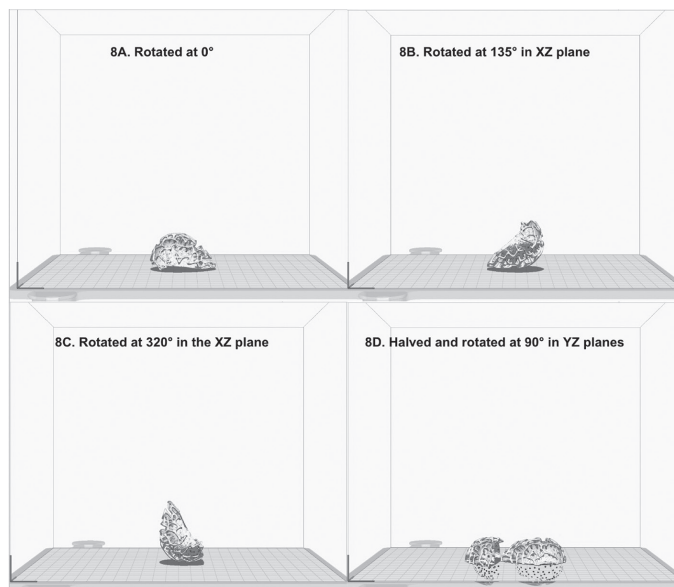


Figura 8. Se muestran cuatro posibles orientaciones de los prototipos (Fuente: Autores, 2025).

Las 4 posibles orientaciones del prototipo de los cascos exoesqueléticos ilustrados en la *Figura 8* muestran los resultados de los perfiles de corte y los tiempos de impresión que fueron mostrados por el motor de corte: Ultimaker Cura.

a. Figura 8A -

- i. Tiempo - 2 horas 48 minutos.
- ii. Material - 7,4 gramos.

b. Figura 8B -

- i. Tiempo - 4 horas 16 minutos.
- ii. Material - 7,4 gramos.

c. Figura 8C -

- i. Tiempo - 4 horas 57 minutos.
- ii. Material - 7,4 gramos.

d. Figura 8D -

- i. Tiempo - 5 horas 48 minutos.
- ii. Material - 7,8 gramos.

2.2.3. Optimización (verificación de prototipado)

Teniendo en cuenta todos los pasos mencionados anteriormente en las iteraciones y la generación del código G, se obtiene un camino claro a seguir para realizar tanto el prototipo a escala como la fabricación final a escala real.

A continuación se realizaron las verificaciones realizadas en esta etapa:

- Iteración seleccionada para prototipado: iteración 2020.
- Orientación seleccionada para la creación de prototipos: modelo sin rotar.
- Estructura de soporte seleccionada: sin estructura.
- Relleno seleccionado: sin relleno.
- Velocidad de impresión: 30%.
- Iteración seleccionada para fabricación: iteración 2020.
- Orientación seleccionada para la fabricación: partida a la mitad y girada 90° en los planos YZ.
- Estructura de soporte seleccionada: sin estructura.
- Relleno seleccionado: 100%.
- Velocidad de impresión: 25%.

Tras la generación del prototipo y la fabricación, se consideró prudente que la etapa final de la metodología se representara mejor como resultado de este trabajo. Por lo tanto, sigue el siguiente apartado de observaciones.

Observaciones

- a.** Ilustrando las etapas de las estrategias de fabricación.
- b.** Destacando las limitaciones, desafíos y tolerancias de las estrategias de fabricación.

Como se destaca en la sección 2 de este documento, las observaciones demostrarían los resultados tanto del prototipo como de la fabricación.

Las iteraciones para modificar la morfología del casco exoesquelético se realizaron directamente desde el software de corte. Sin embargo, el establecimiento de los puntos de impacto iniciales proporcionó un mayor control sobre los puntos de tensión en el dominio topológico del cuero cabelludo (o la carne, según el exoesqueleto algorítmico canónico). De este modo, el algoritmo de diseño procedimental pudo aprovechar la integridad estructural del sistema orgánico.

3. Resultados

Como se muestra en la *Figura 9*, el prototipo a escala impreso en 3D, el busto de Walter White, se imprimió independientemente del modelo 3D. Tras imprimir y limpiar el modelo, se fijó mediante un detalle de ajuste a presión. A escala 1:25, la impresión funcionó como se había simulado y calculado previamente en las simulaciones de corte de Ultimaker Cura.



Figura 9. Se muestra el prototipo a escala impreso en 3D del casco exoesquelético fijado al modelo 3D: el busto de Walter White. Escala 1:25 (Fuente: Autores, 2025).

A continuación se muestran los detalles posteriores a la impresión del prototipo como se muestra arriba:

- Tiempo total de impresión: aproximadamente 3 horas.
- Velocidad total de impresión: 20% para las primeras capas y 30% para el resto de la impresión.
- Material total utilizado: 7,4 gramos.
- Tiempo total de posprocesamiento (eliminación de soportes): 0 minutos.

- Tiempo total de posprocesamiento (eliminación de hilos): aproximadamente 15 minutos.
- Tiempo total de montaje: aproximadamente 1 minuto.

El prototipo requirió lijado después de retirar la adherencia de la placa base del borde. Sin embargo, la falta de estructura de soporte facilitó el posprocesamiento. Debido a la configuración de las impresoras Felix Tec 4 (la placa base se mueve en los ejes Y y Z, lo que dificulta su calibración), las capas iniciales tuvieron que imprimirse a una velocidad significativamente menor. A pesar del cambio del 10 %, el tiempo de impresión se incrementó aproximadamente un 8,34 %.

Tras probar el prototipo a escala 1:25, se probó el sistema de diseño procedimental del exoesqueleto algorítmico, expresado como casco exoesquelético, para la fabricación de un casco a escala 1:1. Esta impresión se realizó en dos partes, siguiendo la metodología mencionada de dividir por la mitad y rotar en el plano YZ (como se muestra en la *Figura 8D*). Sin embargo, en el caso de la fabricación, las dos partes se imprimirían por separado (y no anidadas como se muestra en la figura 8D).

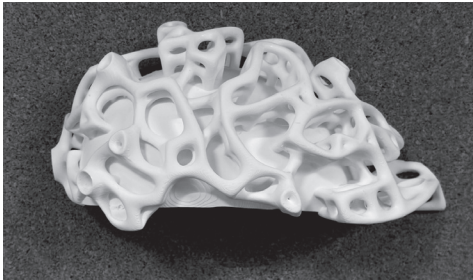


Figura 10.
Se muestra la fabricación mediante impresión 3D de la mitad dividida del casco exoesquelético. Escala 1:1 (Fuente: Autores, 2026).

Como se muestra en la *Figura 10*, la fabricación impresa en 3D se realizó por la mitad. Las impresiones no se pudieron anidar debido al tamaño del casco y al volumen de impresión disponible en un Felix Tec 4. A escala 1:1, la impresión funcionó como se había simulado y calculado previamente en las simulaciones de corte de Ultimaker Cura.

A continuación se muestran los detalles posteriores a la impresión del prototipo:

- Tiempo total de impresión: aproximadamente 26 horas.
- Velocidad total de impresión: 20% para las primeras capas y 30% para el resto de la impresión.
- Material total utilizado: aproximadamente 120 gramos.
- Tiempo total de posprocesamiento (eliminación de soportes): 0 minutos.

- Tiempo total de posprocesamiento (eliminación de hilos): aproximadamente 45 minutos.
- Tiempo total de montaje: aún falta montar.

La estrategia de dividir el casco por la mitad e imprimirlo en dos partes distintas permitió obtener un resultado que optimizó el ciclo de fabricación general. La ausencia de estructura de soporte facilitó el posprocesamiento, una vez más. La impresión también se completó relativamente más rápido (26 horas al 30% de velocidad deberían considerarse rápidas considerando la escala y el volumen), considerando que no tenía estructura de soporte.

Aunque la impresión FDM a la altura de la capa de borrador conservó fielmente los detalles de la morfología, la estrategia de reducción a la mitad complementa la estrategia de montaje. El montaje requeriría ahora una alineación y un encolado precisos. Como alternativa, se podría diseñar un sistema de encaje a presión para ensamblar las mitades. Sin embargo, el sistema se distanciaría bastante de la lógica de los exoesqueletos orgánicos, quitinosos y anisotrópicos.

Imprimir con un material más flexible (como relleno flexible) podría brindar más tactilidad al proceso de fabricación, pero también aumentar el tiempo de impresión y, por lo tanto, no se puede utilizar como un reemplazo directo.

4. Discusión

Los exoesqueletos algorítmicos tienen el potencial de exhibir propiedades estructurales a diversas escalas de diseño. Como se evidencia en el prototipo y la fabricación, la morfología funciona muy bien a pesar de la falta de estructuras de soporte. Incluso como algoritmo de diseño procedimental, UML muestra adaptabilidad para incorporar la optimización de la fabricación como condición de aptitud para asimilar e iterar opciones que podrían implementarse en la vida real a distintas escalas.

La mayor desventaja de la mayoría de los sistemas de diseño procedimental en cuanto a fabricación y producción es su incapacidad para realizar la autopoiesis como lo hace la naturaleza. Si bien todas las pruebas y verificaciones se realizan dentro del ámbito de las técnicas de producción alopoiética existentes (pero de vanguardia), sus resultados muestran invariablemente cierta similitud morfológica con su contraparte orgánica original.

Con la disponibilidad y el acceso a técnicas de fabricación más grandes, más táctiles y precisas, los exoesqueletos algorítmicos tienen el potencial de extrapolarse aún más para optimizar los ciclos de fabricación en una escala y contexto diferentes.

Referencias bibliográficas

- Agisoft. (2024). Agisoft Metashape (Versión 2.1) [Software de computadora].
- Estévez, A.T. (2023). Bioaprendizaje para una arquitectura y diseño sostenibles. Cuaderno 190, Centro de Estudios en Diseño y Comunicación, págs. 65-88.
- Estévez, A.T. (2009). Arquitectura Biodigital. Sesión 19: Nuevos Conceptos y Estrategias de Diseño 3-eCAADe 27, págs. 681-686.
- Fabritius, H., Sachs, C., Raabe, D., Nikolov, S., Friák, M. y Neugebauer, J. (2011). Quitina en los exoesqueletos de artrópodos: del diseño antiguo a la ciencia de materiales novedosos. En Gupta, N. (eds). Quitina: formación y diagénesis, vol. 34, págs. 35-60. Springer, Dordrecht. ISBN electrónico 978-90-481-9684-5.
- FELIXimpresoras. (2018). FELIX Tec 4 [impresora 3D].
- Fillamentum Manufacturing Czech sro (2024). PLA Extrafill (blanco tráfico) [filamento de impresión 3D].
- Karimipour, F.P., Jeffrey, M., Jones-Taggart, H., Pop-Iliev, R. y Rizvi, G. (2021). Desarrollo, procesamiento y caracterización de filamentos nanocompuestos de policaprolactona/nanohidroxiapatita/quitina-nano-whisker para la fabricación aditiva de andamiajes de tejido óseo. Revista del Comportamiento Mecánico de Materiales Biomédicos. 120. 104583. 10.1016/j.jmbbm.2021.104583.
- Maturana, H.R., y Varela, F.J. (1972). Autopoiesis y cognición: la realización de lo vivo. Estudios de Boston sobre filosofía e historia de la ciencia (1.ª ed.). Dordrecht: Reidel, pág. 141.
- Muzzarelli, R. (2010). Nanoestructuras de quitina en organismos vivos. 10.1007/978-90-481-9684-5_1.
- OMG–Object Management Group (2017). Lenguaje de Modelado Unificado OMG® (OMG UML®), versión 2.5.1. Milford, Massachusetts: OMG Group, pág. 754.
- Preisinger, C. (2013), Vinculación de la estructura y la geometría paramétrica. Diseño arquitectónico, 83, págs. 110-113. DOI: 10.1002/ad.1564.
- Raue, L., Klein, H. y Raabe, D. (2010). El exoesqueleto de la langosta americana: de la textura a las propiedades de los algoritmos de diseño. Fenómenos del Estado Sólido, 160, págs. 287-294. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.160.287>.
- Romano, P., Fabritius, H., Raabe, D. (2007). El exoesqueleto de la langosta *Homarus americanus* como ejemplo de material biológico anisotrópico inteligente. Acta Biomaterialia, vol. 3, n. 3, págs. 301-309. ISSN 1742-7061. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2006.10.003>.
- Shiyun, L., Jiamin, Z., Chenyun, P., Fanghang, D., Dagang, Y. (2024). Exploración de las propiedades mecánicas anisotrópicas del exoesqueleto de pinza de langosta mediante modelos fractales. Revista del Comportamiento Mecánico de Materiales Biomédicos. Vol. 159, 106699. ISSN 1751-6161.
- Ultimaker BV (2023). Ultimaker Cura (Versión 5.10.0) [Software].
- Nombre de usuario: fuzzy (2024). Busto de Walter White [Modelo 3D]. Makerworld .
- Warang, A. y Estévez, A.T. (2025). Exoesqueletos algorítmicos: extracción de biointeligencia de exoesqueletos orgánicos encontrados en la naturaleza para desarrollar algoritmos de diseño procedimental. Cuaderno 262. Centro de Estudios en Diseño y Comunicación (2025/2026), págs. 73-92, ISSN 1668-0227.

Zhifei, D. y Ling, L. (2023). Propiedades mecánicas intrínsecas de unidades minerales biogénicas individuales en esqueletos biomineralizados. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 9 (7), págs. 3900-3911.

Abstract: Algorithmic exoskeletons are biosimulation algorithms implemented within a procedural design framework to extract the anisotropic structural integrity present in organic exoskeletons. Algorithmic exoskeletons have previously been employed to generate iterative design solutions across multiple scales. This article advances the research by developing fabrication strategies that leverage the structural integrity embedded in the morphology of organic exoskeletons in order to optimise key manufacturing parameters. The study adopts two discrete fabrication strategies: FDM printing with thermoplastics and stripe-segmentation assembly using sheet materials. Both strategies are illustrated through three sequential stages. First, identifying the scale, use case, and context in order to configure an algorithmic exoskeleton. Second, generating iterative design outputs to optimise fabrication time, material usage, and form complexity within the Rhinoceros® and Grasshopper® design and modelling platforms. Third, illustrating the stages of the two fabrication strategies mentioned above, including their limitations, challenges, and tolerances.

The results presented in this article demonstrate a clear and coherent methodology for developing fabrication and construction processes based on procedural design algorithms that could be applied within the design industry. In addition to demonstrating the scalability of algorithmic exoskeletons, the article also explains how the biolearning workflow may function as an instructional mechanism.

Keywords: Biodigital architecture - Procedural design - Digital fabrication - Stripe segmentation assembly - FDM printing

Resumo: Exoesqueletos algorítmicos são algoritmos de biossimulação implementados em um quadro de design procedimental para extrair a integridade estrutural anisotrópica presente em exoesqueletos orgânicos. Os exoesqueletos algorítmicos têm sido previamente utilizados para gerar soluções de design iterativas em diferentes escalas. Este artigo aprofunda a investigação ao desenvolver estratégias de fabricação que exploram a integridade estrutural presente na morfologia dos exoesqueletos orgânicos, com o objetivo de otimizar parâmetros fundamentais de fabricação.

O estudo utiliza duas estratégias de fabricação discretas: impressão FDM com termoplásticos e montagem por segmentação em faixas utilizando chapas. Ambas as estratégias são apresentadas por meio de três etapas principais. Primeiro, identificar a escala, o caso de uso e o contexto para configurar um exoesqueleto algorítmico. Segundo, gerar resultados de design iterativos para otimizar o tempo de fabricação, o uso de materiais e a complexidade formal dentro das plataformas de design e modelagem Rhinoceros® e Grasshopper®.

Terceiro, ilustrar as etapas das dúas estratégias de fabricación mencionadas, incluíndo as súas limitacións, desafíos e tolerancias.

Os resultados presentados neste artigo demostran unha metodoloxía clara e coherente para o desenvolvemento de procesos de fabricación e construción baseados en algoritmos de design procedimental que poden ser aplicados na industria do design. Além de demostrar a escalabilidade dos exoesqueletos algorítmicos, o artigo tamén explica como o fluxo de traballo de bioaprendizagem pode funcionar como un mecanismo instrucional.

Palabras-chave: Arquiteutura biodigital - Design procedimental - Fabricación digital - Montagem por segmentação em faixas - Impressão FDM

⁽¹⁾ **Angad Warang**, 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**, Arquitecto (UPC, 1983: llegando a ser el arquitecto más joven de España), Doctor en Ciencias (Arquitectura, UPC, 1990: Cum Laude), Historiador del Arte (UB, 1994: Premio Extraordinario Fin de Carrera), Doctor en Letras (Historia del Arte, UB, 2008: Cum Laude), con oficina de arquitectura y diseño en Barcelona (1983-hoy), creando gran número proyectos y obras de edificios, interiores, mobiliario, objetos, grafismo y fotografía. Más de 40 años de docencia e investigación entre las universidades de UPC, TU Wien, HSAK Vienna, UB, Elisava-UPF, UDEM, USTA, y UIC Barcelona, en las Áreas de Proyectos Arquitectónicos, Composición Arquitectónica e Historia del Arte. Fundador y primer Director de la ESARQ (School of Architecture - UIC Barcelona, 1996), donde ejerce como Catedrático de Arquitectura hasta hoy. Creador del grupo de investigación, máster y doctorado “Historia, Arquitectura y Diseño” (UIC, 1998-hoy), y luego 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, ha participado en decenas de exposiciones, congresos y comités, invitado a impartir más de 100 conferencias por todo el mundo sobre sus ideas, proyectos y obras. Ha sido director de 30 tesis doctorales, y otras 8 en proceso, habiendo

sido igualmente de más de cien tesis de máster y tesis de grado (Trabajos Fin de Máster y Trabajos Fin de Grado). Con 7 sexenios de investigación oficialmente reconocidos en el Área de Proyectos Arquitectónicos por las correspondientes agencias de calidad gubernamentales. 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).