

Diseño bio-inspirado un proceso de abstracción creativa

Bio-inspired design a process of creative abstraction

Ludovica Rossi

Arquitecto, Doctor por la ETSAB UPC, Nodo de arte y cultura bio-inspirada RI3 BIOMIMESIS

ludovica.ro@gmail.com.

RESUMEN

El presente artículo describe un proceso de diseño bio-inspirado según la metodología bottom-up, que inicia por la observación del referente natural para su posible implementación a la tecnología. Este enfoque tiene un paso relevante en la abstracción y conceptualización del rol biológico que permite separar el modelo biológico de su aplicación técnica. El mecanismo biológico de referencia es la estructura de madera de sosten interior de las plantas cactáceas. Se pone en relevancia la fase de la investigación que trata la construcción de modelos físicos para la comprensión de la dinámica subyacente del sistema orgánico. Los modelos físicos se encuentran en una fase intermedia de un proceso de diseño iterativo, que permite implementar los mecanismos biológicos más allá de la mímica directa, y poner en práctica de forma creativa los principios biológicos de adaptabilidad y crecimiento.

ABSTRACT

This article describes a bio-inspired design process according to the bottom-up methodology, which begins with the observation of the natural reference for its possible implementation in technology. This approach has a relevant step in the abstraction and conceptualization of the biological role that allows separating the biological model from its technical application. The biological mechanism of reference is the wooden structure of interior support of cacti plants. The research phase that deals with the construction of physical models for the understanding of the underlying dynamics of the organic system is highlighted. The physical models are in an intermediate phase of an iterative design process, which allows implementing biological mechanisms beyond direct mimicry, and creatively putting into practice the biological principles of adaptability and growth.

PALABRAS CLAVES: Bottom-up, Diseño iterativo, Observación, Modelos construidos, Morfología

KEY WORDS: Bottom-up, Iterative design, Observation, Physical models, Morphology

FECHA DE RECEPCIÓN: 24/4/2022 | **FECHA DE ACEPTACIÓN:** 15/6/2022

DOI: <http://dx.doi.org/10.30972/arq.0195964>

1. INTRODUCCIÓN

La biomimética es una disciplina de investigación interdisciplinaria en la que diversas áreas cooperan en proyectos para la implementación de estrategias naturales a la esfera humana. Dependiendo de la experiencia científica, la investigación se concentra más en los aspectos biológicos o más en los aspectos técnicos de la biomimética. La presente investigación aplica un enfoque biomimético Bottom-up sobre el referente natural y la implementación técnica del rol biológico que se analiza. El enfoque Bottom-up (Fig. 1) sigue un proceso ascendente: empezando por la observación y el estudio del modelo biológico se individualizan diferentes pasos

hasta llegar a la abstracción del referente para su aplicación. El desarrollo biomimético ascendente se basa en los conocimientos de las funciones y estructuras biológicas como punto de partida de la investigación (Speck & Speck, 2008). En este enfoque, y en general en biomimética, la abstracción del mecanismo es un paso fundamental que separa el referente biológico de las soluciones encontradas. Para llegar a una implementación técnica la investigación se caracteriza por tener niveles sucesivos de abstracción y modificación. El trabajo aplica el enfoque ascendente con el objetivo de verificar cómo un modelo biológico (la estructura de madera de unas cactáceas) puede ser un generador de conceptos para su aplicación a la tecnología. La metodología de trabajo empieza por analizar la biomecánica y la morfología funcional del tejido de madera del cactus, entendido cómo el sistema biológico de referencia (Fig. 2). El siguiente paso conduce a una comprensión de las estructuras, formas y funciones biológicas, para la comprensión fenomenológica de los principios físicos subyacentes que están involucrados en los mecanismos observados. En este proceso la abstracción del rol biológico separa las soluciones encontradas de sus ejemplos naturales (Speck & Speck, 2008).

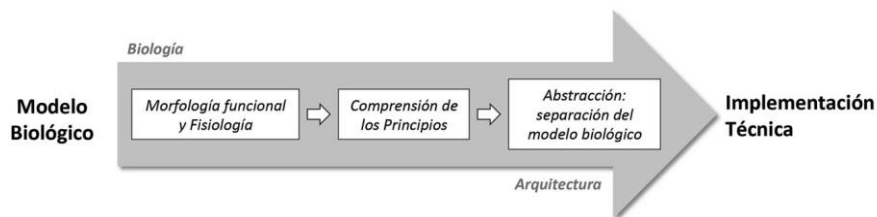


Fig. 1: Esquema de la metodología Bottom-up: progresión del proceso ascendente (de abajo hacia arriba) del diseño biomimético desde las plantillas biológicas hasta la implementación técnica del mecanismo. Fuente: autoría propia 2019



Fig. 2: Fotografía macro estructura seca pala de cactus Opuntia con el tejido ondulado de los haces vasculares. Fuente: autoría propia 2019



Fig. 3: Mayoría de los modelos físicos realizados en banda de rodaduras de los neumáticos de bicicletas. Fuente: autoría propia 2019

Con el fin de desvelar los principios mecánicos básicos involucrados, es necesario estudiar las relaciones funcionales-morfológicas del modelo biológico de forma sistemática. Aquí se prueba la funcionalidad del mecanismo separando progresivamente los elementos que parecen no estar relacionados, para reducir las partes constituyentes que juegan un papel clave. Esto es relevante porque el conocimiento de los componentes básicos que se necesitan para un mecanismo abre la puerta a su uso creativo (Lienhard et al., 2014). Esta visión amplía la libertad de diseño y permite conceptos más allá de la mímica directa. En este trabajo se destaca la implementación de modelos físicos a pequeña escala (Fig 3) como instrumento principal para la comprensión y reinterpretación de los principios mecánicos subyacentes.

Rossi

2. METODOLOGÍA

2.1. El procedimiento de la observación

La observación como metodología de análisis compara la información, el conocimiento y los resultados obtenidos a lo largo del trabajo para su codificación y valoración. En el estudio sistemático del referente orgánico, el proceso de observación se convierte en una parte integral del diseño bio-inspirado, donde el procedimiento de observar implica una interpretación del objeto observado y los instrumentos utilizados inciden en el procedimiento e interpretación.

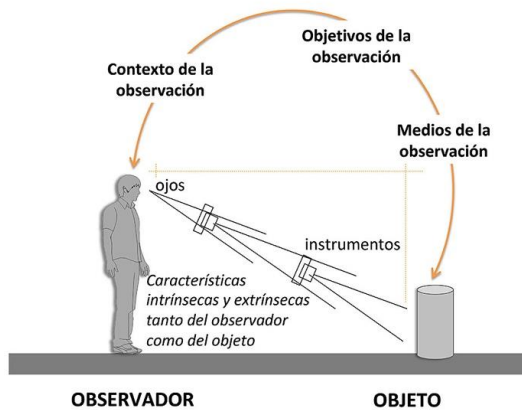


Fig. 4: Diferentes factores que inciden en los resultados durante el procedimiento de observación.

Fuente: autoría propia 2019



Fig. 5: Técnica fotográfica con objetivo macro y fuente de ampliación óptica para la observación del tejido seco.

Fuente: autoría propia 2019



Fig. 6: Cactus, género *Opuntia*, crece dentro de los espacios de la valla, adaptando sus tejidos (Vilassar de Mar).

Fuente: autoría propia 2019



Fig. 7: Limpieza del Cactus *Echinopsis pachanoi* muestra la estructura de haces vasculares de madera en el interior del tallo columnar. Fuente: autoría propia 2019

El proceso de observación (Fig. 4) se aplica desde el inicio del estudio del rol biológico. Algunas de las características de la estructura de madera seca de las cactáceas son visibles a escala real (por su tamaño) y la fotografía macro, con o sin fuente de aplicación óptica (Fig. 5), permite la observación a una escala ampliada. Este procedimiento focaliza la interpretación del tejido compuesto por fibras onduladas con una dirección longitudinal dominante.

El trabajo analiza diferentes especies de la familia de la Cactaceae pertenecientes a las dos subfamilias de Cactoideae y Opuntioideae. Con el estudio de muestras del tejido seco y de plantas vivas en diferentes lugares, junto a muestras cultivadas en macetas. La observación de las plantas en su entorno natural, permite estudiar el crecimiento según su adaptación al medioambiente. Un caso significativo es el del género *Opuntia* que modifica sus tejidos para crecer más allá de una valla metálica (Fig. 6). También la observación de individuos en maceta, durante un periodo prolongado, ha permitido estudiar la fisiología de las plantas. Es el caso de un individuo joven del género *Echinopsis*, que se ha podido secar reproduciendo, en parte, las condiciones del entorno natural (Fig. 7). El estudio de campo, por comparación de varios individuos, proporciona las bases que unen el conocimiento teórico de la fisiología del organismo con la respuesta que la planta viva debe dar para adaptarse y seguir creciendo.

El análisis del procedimiento de observación no se aplica únicamente al estudio del referente biológico. Esta metodología está presente a lo largo de la investigación y se aplica:

- A la comparativa entre el referente orgánico y los modelos realizados para la comprensión de los mecanismos morfológicos y fisiológicos de la planta;
- A la construcción de los modelos físicos (según materiales y métodos utilizados) para reproducir el comportamiento morfológico de adaptación y crecimiento de la planta viva y que define el ámbito de aplicación de las estructuras en flexión activa.

2.2. Los modelos como método

La construcción de los modelos es una parte experimental del trabajo. Esto responde a la idea de descubrir lo desconocido siguiendo el ejemplo del arquitecto Frei Otto: *“El ojo interior del cerebro no debe ser plano sino tridimensional para que todo sea un objeto en el espacio. No estamos viviendo en un mundo bidimensional”* (McGuirk, 2015). La realización de modelos permite pensar en tres dimensiones, donde la construcción de los modelos físicos involucra el comportamiento del material y la representación virtual permite codificar la geometría de la morfología generada.



Fig. 8: Puesta en tensión de una malla regular en banda de neumáticos recuperados de bicicletas, por el tejido elástico permite un comportamiento dinámico según los esfuerzos externos aplicados. Fuente: autoría propia 2019

El desarrollo de estructuras flexibles bio-inspiradas necesita la implementación de modelos físicos sin los cuales no sería posible entender la forma en su totalidad. La construcción de modelos físicos es el método aplicado para estudiar la relación entre las fibras orgánicas y el comportamiento del tejido en campo elástico (y no rígido). La reproducción material permite verificar cuales mecanismos morfogenéticos están ligados al sistema constructivo y pone en relación la observación de la plantilla biológica estática con el comportamiento dinámico del tejido (Fig. 8). La metodología principal es la construcción de modelos físicos, los conceptos de materialidad y manipulación son fundamentales en el desarrollo del análisis.

El desarrollo de los modelos permite la comprensión fenomenológica de los principios físicos subyacentes. La metodología es abierta para reconfiguraciones y adaptaciones sucesivas, en un proceso de diseño iterativo donde la retroalimentación de la construcción real puede llegar tan lejos como para fomentar la comprensión del modelo biológico (Lienhard et al., 2014). La interpretación aplicada a un prototipo permite extraer unas valoraciones, las cuales inciden en la observación del organismo y a su vez en su interpretación (Fig. 9). Hasta llegar a la construcción de un modelo capaz de agrupar un número suficiente de características que reproducen los mecanismos biológicos y/o fisiológicos del organismo. En este esquema de relaciones el proceso de interpretación y la construcción de los modelos asumen suficiente coherencia y pueden ser considerados válidos.

La experimentación con modelos sucesivos lleva implícita la metodología de prueba y error. El método tiene un componente intuitivo y práctico. Por medio de la repetición de experimentos, en los cuales cambiando una o más variables, se modifica el comportamiento del sistema y se obtienen resultados diferentes, que se valoran necesarios, relevantes o no significativos para la temática tratada, según el caso. El procedimiento se considera válido porque la investigación se desarrolla en el campo morfológico que pone en relación la generación de la forma según aspectos biológicos: la forma ondulada de las fibras orgánicas del tejido de madera del cactus.

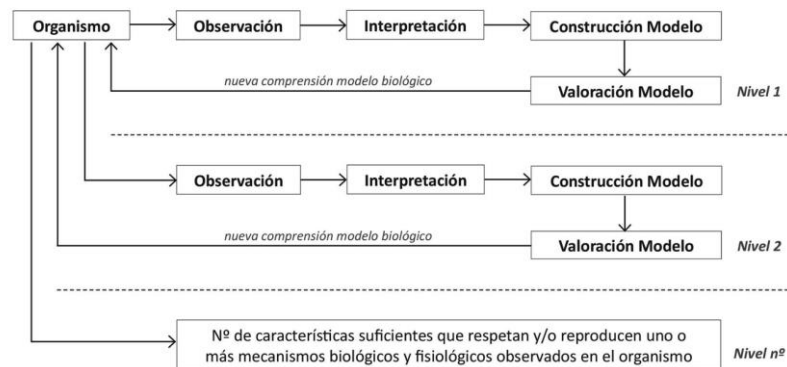


Fig. 9: Procedimiento iterativo del diseño bio-inspirado, cuando las relaciones entre interpretación del rol biológico y el comportamiento de los modelos asumen coherencia, los resultados se consideran válidos. Fuente: autoría propia 2019

3. PROCESO DE GENERACIÓN DE LA FORMA EN EL DISEÑO BIO-INSPIRADO

3.1. Interpretación del rol biológico

La abstracción del rol biológico de la estructura de madera del cactus depende de la escala de análisis en la observación del comportamiento del tejido vivo, no seco. La forma ondulada del tejido de sostén es visible a *ojo desnudo*, ampliando la imagen por medio de la fotografía macro, se pone en evidencia su crecimiento en la trayectoria longitudinal. La fragilidad del tejido seco se observa entre las uniones de las fibras, más que en su espesor, mientras la sección ofrece una cierta resistencia por las propiedades del material (Fig. 10). El tejido vivo es interpretado como un material continuo que crece linealmente y sus variaciones dependen de las condiciones ambientales externas en las cuales se ha desarrollado la planta. El material está conformado por franjas curvilíneas que se entretajan entre ellas y se funden en una única estructura leñosa. La estructura muerta es rígida y ha perdido su flexibilidad, pero cuando la planta está viva la estructura funciona en su conjunto como una esponja adaptándose a las variaciones de presión interna para la conducción y transporte de los líquidos y de los nutrientes almacenados.

Debido a estas características, la interpretación de la estructura se orienta hacia la unión de elementos longitudinales, con una sección vertical dominante respecto a la transversal. Esta es una abstracción geométrica del referente orgánico, la cual determina el desarrollo sucesivo de la investigación biomimética. Esta abstracción del rol biológico está motivada por el hecho que:

- La planta se desarrolla en la misma dirección del crecimiento de las fibras de madera
- Se expande por sumatoria aumentando el número de franjas en el tejido y agregando tejidos compuestos por franjas.

Estos factores han determinado la interpretación del tejido del cactus en un modelo compuesto por agregación de elementos lineares en comparación a otras conceptualizaciones posibles. Las fibras orgánicas son reproducidas como franjas unidas entre ellas a diferentes intervalos y medidas dependiendo del experimento realizado (Fig. 11). La franja deviene la escala de representación del organismo y la morfología del modelo se define a partir de la agrupación de franjas unidas entre ellas de forma más o menos regulares.



Fig. 10: Tejido de madera seco de cactus donde la trayectoria y ancho de las fibras varían según las concisiones específicas que ha vivido el organismo.
Fuente: autoría propia 2019

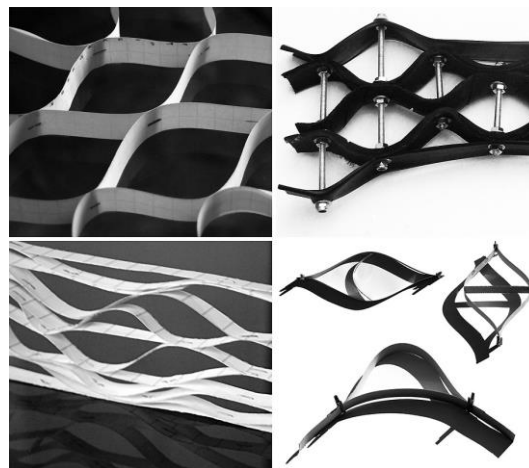


Fig. 11: El elemento morfológico de base de la franja junto a las uniones y las propiedades del material reproducen las dinámicas de elasticidad del tejido vivo de la plantas.
Fuente: autoría propia 2019

El proceso de abstracción del mecanismo, es uno de los pasos relevantes para separar los principios biológicos descubiertos del referente natural. Cada fenómeno natural por cuanto simple es en realidad compuesto, y cada efecto visible es la suma de un número infinito de acciones subordinadas. *El crecimiento y la forma son, bajo todos los aspectos, de naturaleza compuesta* (Thompson, 1969, 292). Para separar los fenómenos involucrados, la construcción de modelos físicos permite observar la relación dinámica entre las fibras y el comportamiento del tejido en su conjunto. Por medio de la forma física se estudia el comportamiento morfológico del tejido orgánico.

El análisis morfo-genético de la estructura de la planta pone en relación la forma con la fisiología y el crecimiento del organismo vivo. La reproducción abstracta del tejido orgánico, por medio de modelos, permite iniciar el análisis sobre el proceso de generación de la forma y definir la franja como el elemento morfológico de base. Ésta por sí sola no responde necesariamente a los principios de agregación o adaptabilidad del tejido orgánico (Schleicher et al., 2014). Definir la franja como elemento morfológico base permite individuar una forma que se arquea, sometida a las deformaciones laterales, que genera un entramado que se abre y cierra por factores geométricos y según las características de elasticidad del material utilizado.

3.2. Implementación técnica del mecanismo bio-inspirado

Las principales pruebas realizadas, junto al análisis del tejido de madera de la planta, han definido la elección de orientar la construcción de los modelos por franjas unidas entre ellas. En el tejido vivo de la planta las franjas se muestran como una estructura elástica que adapta su

Rossi

curvatura a las necesidades fisiológicas del organismo. Análogamente los modelos deberían acercarse a esta característica. D'Arcy Thompson, en su libro "Sobre el crecimiento y la forma", cuando trata la relación de resistencia que ofrece el hueso y las fuerzas que se deben generar, recuerda que, hace referencia al hueso vivo, y que un hueso muerto y seco es una cosa muy diferente (Thompson, 1969, 244). De hecho uno de los aspectos recurrentes en las diversas fases de observación, interpretación y construcción de los modelos ha sido la relación entre el movimiento curvilíneo del tejido vegetal y la construcción de un modelo que pudiera mantener análogas características de adaptabilidad.

Una de las propiedades primaria que definen la realización de los modelos es el material principal empleado para la construcción de las franjas. Este determina la relación entre la morfología del modelo y la interacción de las fuerzas internas y/o externas que se generan. El comportamiento del modelo será diferente si el material es más o menos rígido/flexible. En paralelo se ha experimentado con diversas medidas, proporciones y/o tipos de uniones que han determinado una variedad de configuraciones, descritas en los apartados sucesivos y que permiten definir las características geométricas y formales del sistema (morfología general).

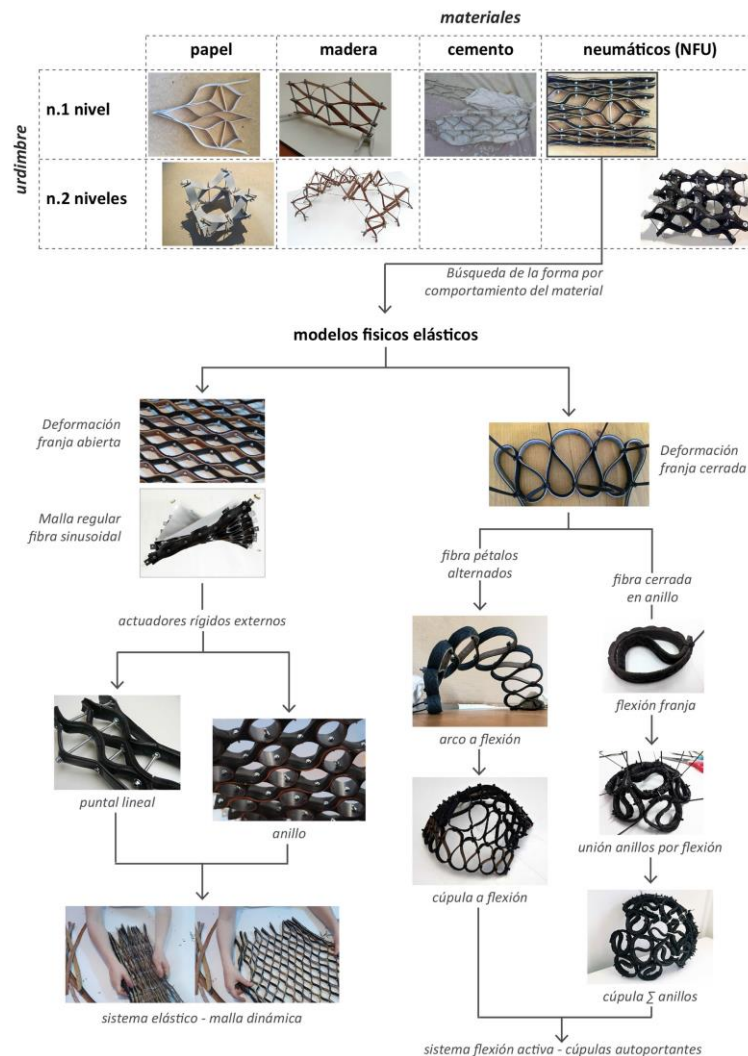


Fig. 12: Experimentos sobre la abstracción del rol biológico del tejido estructura de la madera del cactus. Se verifican la relación entre la franja (elemento morfológico base), los materiales utilizados para la materialización de las fibras y el nivel de urdimbre aplicado a la trama. El desarrollo de los modelos físicos en banda de rodadura de bicicleta, con un único nivel de urdimbre, permite asociar la forma con el tejido elástico vivo de la planta. Fuente: autoría propia 2019

En la sucesión de los experimentos se define la deformación de las fibras como un elemento activo para determinar la morfológica del sistema. La combinación de las deformaciones asociadas a las franjas unidas entre ellas genera una red de elementos curvilíneos. El conjunto de las franjas, más o menos deformadas, y unidas entre ellas en un ritmo regular o aleatorio, construye una superficie que se extiende en el espacio tridimensional y que es posible definir como una malla o red.

Este es resultado de la suma de las franjas y asume diferentes configuraciones morfológicas según las deformaciones aplicadas a las franjas. Se individualizan diferentes tipología espaciales según las deformaciones aplicada al elemento base: malla sinusoidal por la unión regular de las franjas y mallas autoportante por franjas pre-deformadas curvadas y cerradas sobre si mismas (Fig. 12).

La definición de la franja como elemento base ofrece la posibilidad de estudiar la génesis de la forma de los tejidos orgánico. Esto junto al uso de un material altamente flexible, como la banda neumática de bicicleta, ofrece la posibilidad de llevar al límite la morfología bio-inspirada en el tejido vivo del cactus y así verificar la reproducibilidad técnica de las dinámicas naturales.

Si bien un modelo funciona como una aproximación, en referencia a la construcción a escala real, está sujeto a las dinámicas físicas según su tamaño, las dimensiones y el comportamiento de los materiales por ser un objeto tangible. Esto permite verificar cuáles mecanismos morfogenéticos están ligados al prototipo constructivo. Se definen dos mecanismos observables, según se analiza la franja individualmente o el tejido en su conjunto:

- El efecto resorte – la franja ejerce y recibe unos empujes en relación con las otras circunstancias donde el tejido queda abierto por equilibrio de esfuerzos internos. Esto se observa en los modelos construidos a partir de uniones irregulares con longitudes diferentes o con aplicación de deformaciones previas que giran y curvan las franjas.
- El efecto fuelle – el tejido trabaja de forma similar a una esponja que se expande y se contrae. Este comportamiento es visible en las mallas construidas a partir de uniones regulares alternadas que abre y cierra sus fibras por la acción de esfuerzos de tracción externos y/o por la introducción de actuadores internos.

Estos dos mecanismos (resorte y fuelle) propios de las fibras orgánicas dependen de la flexibilidad de los modelos. La malla en su conjunto asume diversas configuraciones dependiendo de la distribución de las franjas en el sistema. La morfología es definida por el material empleado (según el sistema de uniones implementado y la escala del modelo) que actúa juntamente con la forma del elemento base de la franja y a la geometría de agregación.

El comportamiento de los modelos realizados en banda neumática de rodadura pone en evidencia los principios de diseño en flexión activa. Estas estructuras basan su comportamiento en las propiedades geométricas y las características elasticas del material, donde la deformación es un elemento activo en la definición morfológica del sistema (Rossi, 2019).

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La escala del modelo, sus dimensiones globales y las proporciones entre las partes inciden en el comportamiento de la forma obtenida. A dimensiones diferentes un mismo modelo puede comportarse de maneras diferentes, por lo cual en el análisis y valoración de los resultados obtenidos se debe tener en cuenta que con un cambio de escala existen factores que inciden diversamente. El efecto de la escala no depende del objeto en sí, sino de su relación con el entorno del mundo físico que lo rodea. *La naturaleza siempre opera respetando las escaleras, y todas las cosas tienen su tamaño adecuado* (Thompson, 1969, 24).

Las pruebas físicas realizadas llegan a definir los modelos en franjas flexibles de banda de rodadura de neumáticos de bicicletas reutilizados como material para el desarrollo morfológico. La realización de los modelos tiene en cuenta la escala de construcción, ya que la influencia de los factores físicos depende en gran medida del tamaño del objeto y donde el peso del material

Rossi

incide en el comportamiento estructural. A mayor escala de los modelos físicos, por lo cual a un mayor volumen y a un mayor peso, la fuerza de gravedad incidirá de forma diferente.

Trabajar en el espacio tridimensional y definir un objeto tangible permite observar el comportamiento del material. Utilizando una metodología que desarrolla la forma espacial mediante la construcción de modelos físicos, el material es parte integrante de los resultados. Esto resulta particularmente válido trabajando en el ámbito de la flexibilidad donde la forma varía según el estado de tensiones. Los modelos (aunque a pequeña escala) permiten definir la forma según las deformaciones y el comportamiento físico del material (Fig. 13). Este actúa junto a la geometría y al sistema de uniones para definir la morfología. Un material altamente flexible como la banda neumática ofrece la posibilidad de llevar al límite la forma bio-inspirada en el tejido vivo del cactus y así verificar la reproducibilidad de las dinámicas naturales.

Las características geométricas de las fibras definen las propiedades iniciales del sistema morfológico. Este es definido en comparación a la capacidad de adaptación del tejido orgánico vivo, y se desarrolla a partir de las dinámicas de equilibrio obtenidas en la construcción de los modelos. El entorno de trabajo se caracteriza por la relación que existe entre objeto/materia, y donde la deformación es parte relevante en la definición del desarrollo geométrico.

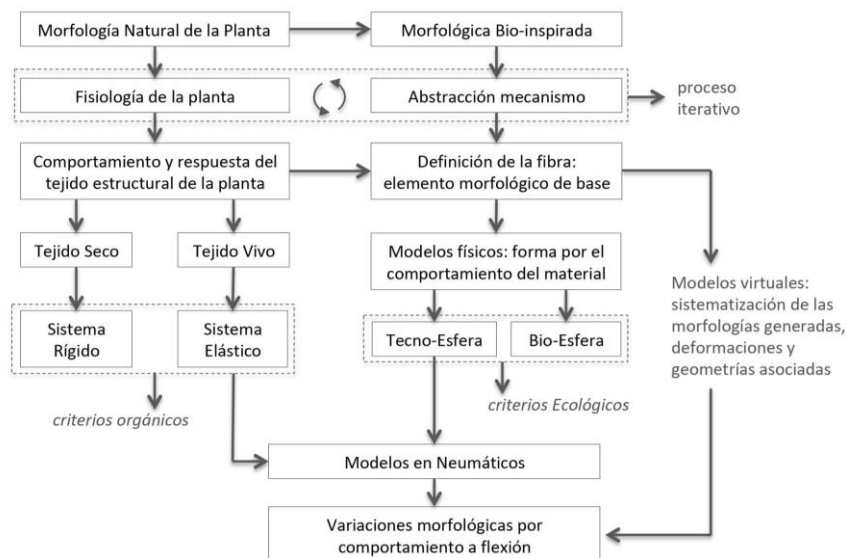


Fig. 13: Proceso de desarrollo de la implementación técnica del mecanismo bio-inspirado en base a criterios orgánicos y ecológicos aplicados en el proceso de diseño iterativo. Fuente: autoría propia 2019

La estructura del trabajo utiliza sistemáticamente las similitudes entre la naturaleza y los desafíos del diseño para inspirar a los diseñadores. En primer lugar, se pueden desarrollar aplicaciones en base a la apariencia (mímica directa). En segundo lugar, la inspiración conceptual permite la creación de reglas o patrones de diseño que siguen modelos de roles biológicos (Speck et al, 2017). De forma similar, los modelos físicos permiten definir los mecanismos y patrones mediante el elemento morfológico de base (la franja) y el comportamiento del sistema bio-inspirado. En tercer lugar, la inspiración computacional, mediante la transferencia del diseño generativo y la morfogénesis natural, permite la sistematización de la información por medio de su representación (Rossi, 2020).

El procedimiento de simulación definirá las leyes de transformación que generan la forma y el entorno digital permite codificar la geometría de modelos elásticos contruidos. La digitalización de la información obtenida por los modelos físicos es un paso necesario para seguir con la investigación bio-inspirada. Los modelos virtuales representan otro nivel de abstracción, es una herramienta que permite ordenar las informaciones y dividir las acciones realizadas

manualmente (Rossi, 2020). Esta relación entre referente natural, construcción de modelos físicos y digitalización de la información mantiene la relación de un diseño iterativo en el cual cada parte participa en la comprensión de las otras. Es un sistema de investigación abierto que puede llegar tan lejos como el mundo natural que nos rodea.

CONCLUSIONES

Implementar un proceso de diseño biomimético ascendente (bottom-up) ha llevado al uso de la franja como elemento geométrico base para reproducir las dinámicas del tejido vivo de los cactus. La elección del uso de un material altamente flexible incluye el trabajo en la línea de investigación de estructuras o sistemas que aplican la flexión activa en el proceso de diseño.

Los modelos físicos se comparan con la biomecánica y la morfología funcional del cactus poniendo en relación la fibra orgánica con el comportamiento del tejido en su conjunto. Se analiza la relación entre el movimiento curvilíneo del tejido vegetal y la construcción de un modelo con análogas características de adaptabilidad. Este procedimiento conduce a la abstracción del mecanismo orgánico y separa el modelo biológico y los principios descubiertos.

Se exploran las condiciones por las cuales la morfología puede adaptarse sin tener que conformar a priori la forma, permitiendo investigar la capacidad de auto-organización del sistema. La interpretación del mecanismo biológico define un sistema por unión de elementos longitudinales (franjas), con una sección vertical dominante respecto a la transversal. Los resultados obtenidos varían en función del sistema de uniones. Este es un factor que incide en los grados de libertad del modelo y ofrece diferentes prestaciones en el control de la forma.

La investigación se enfoca en el descubrimiento de mecanismos biológicos como fuente para indagar la tecnología de forma creativa. En este contexto la realización de los modelos físicos se encuentra en el medio del desarrollo de la investigación, es una metodología que permite comprender las funciones del rol biológico. Asimismo permiten poner en práctica de forma abstracta los principios biológicos de adaptabilidad y crecimiento.

Avances sucesivos del estudio bio-inspirado tienen en cuenta la codificación y sistematización de las geometrías de cada modelo según las condiciones de escala y los materiales necesarios a su construcción. En todo caso se pone de manifiesto como los sistemas biológicos son una fuente de estudio válida para la implementación de una tecnología creativa que permita aumentar la complejidad de gestión del sistema construido.

BIBLIOGRAFÍA

- Lienhard, J., Schleicher, S., Knippers, J. (2014). Bio-inspired, flexible structures and materials. En *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering Edition* (cap.11). Suiza: Springer Ed.
- McGuirk J. (2015). Entrevista a Frei Otto. En *ICON 023*, Mayo 2015, on-line: <https://www.iconeye.com/design/item/2627-frei-otto-%7C-icon-023-%7C-may-2005> (última visita 08/2018)
- Rossi, L. (2020). Procesos generativos para morfologías bio-inspiradas en el tejido de madera del cactus. En *Arquitecto*, Núm. 16, Noviembre, República Argentina: Ed ITDAH.
- Rossi, L. (2019). Diseño en flexión activa con neumáticos recuperados (tesis doctoral). ETSAB - UPC, Barcelona. Recuperado de <https://www.tdx.cat/handle/10803/668046#page=1>
- Schleicher, S., Lienhard, J., Poppinga, S., Speck, T., Knippers, K. (2014). A methodology for transferring principles of plant movements to elastic systems in architecture. en *Computer-Aided Design*, Vol. 60, Ed. ELSEVIER, 105-117.
- Speck, O., Speck, D., Horn, R., Gantner, J., Sedlbauer, K. P. (2017). Biomimetic bio-inspired biomorph sustainable? An attempt to classify and clarify biology-derived technical developments. En *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol 12 Núm. 1, Ed. IOP Publishing Ltd.
- Speck, T., Speck, O. (2008). Process sequences in biomimetic research. *Design and Nature*, IV Comparing Design in Nature with Science and Engineering, 3-11.
- Thompson D'Arcy, W. (1969). *Crecita e Forma*. Torino: Ed. Universale Scientifica Boringhieri.