

BIOMÍMESIS EN ARQUITECTURA E INGENIERÍA ESTRUCTURAL*

Leonardo Moreno De Luca**

María Jimena Galvis Chacón***

René José García****

Universidad Santo Tomás de Bucaramanga

Recibido: 23 enero 2012

Aprobado: 2 marzo 2012

La naturaleza es fuente de inspiración para la biomímesis, que pretende ser ambientalmente compatible con el mundo natural. Fotografía de Leonardo Moreno de Luca, 2011.



* Este artículo es resultado del proyecto de investigación "Aplicación de biomímesis para solucionar necesidades estructurales funcionales, estéticas y tecnológicas de objetos arquitectónicos" aprobado en la Tercera Convocatoria interna de Semilleros de investigación de la Universidad Santo Tomás de Bucaramanga, 2011, presentado por el grupo ARAGOE de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Santo Tomás de Bucaramanga.

** Ingeniero Civil, MSc. (c) en Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, (UIS) Estudiante de Arquitectura IX, Semestre, Universidad Santo Tomás, (USTA) Bucaramanga, Colombia. leonardo.moreno.l@correo.uis.edu.co

*** Estudiante de Arquitectura, IX Semestre, Universidad Santo Tomás (USTA) Bucaramanga, Colombia. jimenagalvis90@hotmail.com

**** Arquitecto, Universidad del Atlántico D.E.A y candidato a Ph. D. por la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Docente e Investigador en la Universidad Santo Tomás de Bucaramanga, Colombia. renejgarcia@mail.ustabuca.edu.co

RESUMEN

La biomímesis tiene una gran cantidad de aplicaciones en prácticamente todos los campos científicos, académicos y profesionales. En las últimas décadas, esta "nueva" ciencia ha tomado mucha fuerza debido a que las aplicaciones que se han llevado a cabo han sido satisfactorias, lo que demuestra el potencial de su uso. En el presente documento se expone sucintamente el significado de biomímesis y se presentan algunas de las aplicaciones que puede tener en el campo de la Arquitectura y de la Ingeniería Civil. Estas aplicaciones están divididas, según el criterio y el interés de los autores en el tema, en tres grandes grupos: la forma, los procesos, y la estructura. Dentro de cada uno de estos grupos se exponen ejemplos concretos que se han implementado, o que se piensan implementar, en el diseño arquitectónico y estructural. Por medio de los ejemplos presentados se puede ver el enorme potencial que puede llegar a tener el uso generalizado de la biomímesis en todo el campo del diseño y la construcción de objetos arquitectónicos.

PALABRAS CLAVE

Biomímesis, diseño arquitectónico, diseño estructural, forma, procesos, estructura.

BIOMIMICRY IN ARCHITECTURE AND STRUCTURAL ENGINEERING



Detalle de cubierta en "Proyecto Edén", Inglaterra. Fotografía de Leonardo Moreno de Luca, 2011.

ABSTRACT

Biomimicry has a huge quantity of applications in almost all scientific, academic and professional fields. In the last decades, this "new" science has taken a lot of strength because of the successful applications that have been carried out, demonstrating the potential of its use. In the present document is exposed, in a concise way, the meaning of biomimicry and is also presented some of the applications that this science can have in the field of Architecture and Civil Engineering. According to the criteria and to the specific interest of the authors, these applications are divided in three principal groups: form, processes and structure. Inside of each one of these groups there are exposed some particular examples that have been implemented, or that are thought to be implemented, in architectonic and structural design. Through these examples it can be seen the great potential that a generalized use of biomimicry in all the field of design and construction of architectural objects can have.

KEY WORDS

Biomimicry, architectural design, structural design, form, processes, structure.

INTRODUCCIÓN

La palabra biomímesis proviene del griego bios, vida, y mimesis, imitación¹. La biomímesis es el estudio, entendimiento, replicación y adaptación de los principios, métodos y sistemas naturales aplicables a diseños de escala humana, como los pertinentes a la Ingeniería, la Arquitectura y la tecnología. La biomímesis pretende hacer que dichos diseños sean más eficientes, óptimos y ambientalmente compatibles con el mundo natural actual. La inspiración, para alcanzar los fines anteriores, recae en la naturaleza ya que durante millones de años, por medio de ensayo y error, ésta ha producido soluciones efectivas a problemas del mundo real mediante adaptaciones evolutivas, que tienen como base fundamental el proceso de selección natural darwiniano.

“Todos los problemas que intentamos resolver ya han sido resueltos por la naturaleza durante millones de años de evolución” – Janine M. Benyus

Janine M. Benyus, actualmente pionera en el tema, plantea tres grandes enfoques en los cuales se puede desarrollar la biomímesis a la hora de crear nuevos diseños e ideas que pretendan solucionar ciertas necesidades o problemas. El primero sería “La naturaleza como modelo” donde se expone a la biomímesis como una ciencia que estudia los modelos naturales para luego imitarlos, o utilizarlos como inspiración (por ejemplo el diseño de una celda solar inspirada en una hoja). El segundo es “La naturaleza como medida”, aquí se presenta la utilización de un estándar ecológico, por parte de la biomímesis, para juzgar lo que sería correcto, o no, de las innovaciones elaboradas; la naturaleza ha aprendido, después de tantos millones de años, lo que funciona, lo que es apropiado y lo que perdura. Por último, aparece “La naturaleza como mentor”, rama que toma a la biomímesis como una nueva manera de ver y valorar a la naturaleza, introduciendo así una era basada en lo que se puede aprender del mundo natural, no en lo que se puede extraer de él.

De esta manera, la biomímesis es aplicable a todo tipo de diseños. Desde biólogos, diseñadores, ingenieros y demás científicos, se inspiran en la naturaleza para generar nuevas soluciones². Un ejemplo claro es lo realizado por la casa automotriz Mercedes Benz, la cual sacó al mercado un nuevo diseño llamado *Bionic car*³, un automóvil que busca mejorar su rendimiento aerodinámico, aumentar la seguridad y comodidad y, sobre todo, contribuir con el medio ambiente. El principal objetivo de este auto es reducir aproximadamente un tercio del peso de la carrocería total sin alterar en lo más mínimo la estabilidad y la seguridad en caso de colisión. Para conseguirlo, la casa Mercedes Benz buscó en la naturaleza un ser vivo que sirviese de inspiración debido a un determinado rendimiento aerodinámico, escogió, después del respectivo análisis, al pez cofre. Este pez posee un cuerpo rígido y fortificado, con forma cúbica que le proporciona ciertas características aerodinámicas (deseadas en el diseño del vehículo), que le permiten ser un ágil nadador. Prueba de esto es que en un segundo puede recorrer 6 veces la longitud de su cuerpo. La inspiración para el diseño del automóvil se basa entonces en la relación entre rigidez y peso que presenta el pez (alta rigidez, poco peso) y, en su geometría. De esta manera fue posible alcanzar los objetivos planteados inicialmente.

1 BENYUS, Janine (1997), *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. New York, Harper Perennial.

2 Vincent, J. (2006) “Applications: Influence of Biology on Engineering”, En: *Journal of Bionic Engineering*, No.3, pp.161-177.

3 Neurohr, R. y Dragomirescu, C. (2007) “Bionics in engineering – defining new goals in engineering education at politehnica University of Bucharest”, En: *International Conference on Engineering Education – ICEE 2007*. Coimbra, Portugal.

Por otro lado, se presenta el ejemplo del tren bala japonés Shinkansen⁴, uno de los más rápidos del mundo, el cual alcanza una velocidad de 320 km/h. Durante el proceso de diseño, el tren presentaba, en las pruebas de funcionamiento, altos niveles de sonido producidos por los cambios de presión en la entrada y salida de los túneles que hacen parte de su recorrido. Por este motivo, los ingenieros diseñadores buscaron en la naturaleza una solución para dicho problema, encontraron un ave que les llamó la atención debido a su agilidad, velocidad y al poco impacto que generaba al sumergirse en el agua para cazar sus presas. El Martín Pescador fue estudiado a fondo durante largo tiempo, encontraron que dichas habilidades se debían al tamaño y forma de su pico. Por consiguiente, se realizó un análisis exhaustivo del pico con el fin de replicarlo para el diseño de la parte frontal del tren. Esta analogía del ave resolvió por completo los altos niveles de sonido, aumentó la velocidad del tren y redujo en un 15% la energía consumida inicialmente⁵.

En cuanto a la Arquitectura y la Ingeniería Civil, las soluciones biomiméticas que se han llevado a cabo generaron proyectos muy interesantes desde el punto de vista de la sostenibilidad, de la solución estructural, funcional, estética y tecnológica, que han producido proyectos integrales que sirven como catálogo de múltiples soluciones que pueden emplearse en nuevos proyectos. Para citar un ejemplo, se presenta el *Eastgate Building Harare* en África⁶, el cual imita los principios básicos de termorregulación de una especie de termita africana. El Arquitecto diseñador de este proyecto, Mick Pearce, se inspiró en los termiteros que construyen dichos insectos, siendo su interés principal la dosificación de energía calórica (producida en su interior) que estas estructuras realizan, con el fin de mantener una temperatura óptima tanto de día como de noche. El edificio, al igual que el termitero, se orienta en el eje norte-sur (eje de los vientos predominantes). Su morfología es similar a la de una chimenea, extrae el aire caliente (menos pesado) y renueva el aire que se encuentra en el interior por medio de corrientes más frescas (aire más pesado) presentes en la parte inferior. De esta manera se crea una red de conductos que actúan como un sistema de refrigeración, evitando la instalación, o por lo menos reduciendo las horas diarias de funcionamiento, de maquinaria de condicionamiento de aire. Como resultado, el edificio consume únicamente el 7% de la energía que consume un edificio de oficinas tradicional⁷.

Otra aplicación interesante de biomímesis en el campo del diseño arquitectónico y estructural, se presenta cuando se concibe a la estructura como parte significativa del valor formal del objeto arquitectónico. Un gran exponente de este principio es el maestro Gaudí, el cual fundamentaba la forma de las estructuras principalmente en la naturaleza, caracterizándose éstas por una capacidad de generación geométrica y por unas posibilidades plásticas inigualables. Gaudí planteaba que “la naturaleza puede descomponerse con ayuda de la geometría, que se erige como instrumento fundamental de la arquitectura”⁸. Por ejemplo, las columnas de la sagrada familia de Gaudí, denominadas por el mismo como “bosque de columnas”, se inspiran en la característica geométrica de los árboles denominada ramificación. De esta manera sustentan el techo en múltiples puntos, permitiendo la obtención de elementos más esbeltos y ligeros, cada uno de ellos une los diferentes puntos en la cubierta con un único punto en el suelo. Como resultado, se reduce la cantidad del material empleado y, a su vez, se tiene un alto potencial estético⁹.

4 BENYUS, Janine (1997), *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. New York, Harper Perennial.

5 *Biomimicry in Action* (2009, Julio) Benyus, J., Oxford, TED Talks.

6 Turner, J. y Soar, R. (2008) “Beyond Biomimicry: What termites can tell us about realizing the living building”, En: *First International Conference on Industrialized, Intelligent Construction – I3CON*. Leicestershire, UK.

7 *Biomimicry in Action* (2009, Julio) Benyus, J., Oxford, TED Talks.

8 TÁRRECH, Armand Puig (2011), *La Sagrada Familia según Gaudí*. Barcelona, El Aleph Editores.

9 STEVENS, Peter (1987), *Patrones y pautas en la naturaleza*. Barcelona, Salvat Editores.

“El libro, que siempre permanece abierto, y que uno debe tratar de leer, es el de la naturaleza (...). La naturaleza guía a través de los hechos.” Antoni Gaudí

Figura 1. Catedral Sagrada Familia, Barcelona, España. Foto Arquitecto Pedro Gómez Bejarano.



Como se puede ver en los ejemplos anteriores, la biomímesis es aplicable en muchos campos distintos, siendo del interés de los autores el referente al diseño arquitectónico y estructural. Por consiguiente, a continuación se presenta una estructura encabezada por tres componentes principales, forma, procesos y estructura. Dentro de cada uno de ellos se despliegan algunos principios biomiméticos que corresponden al tema de interés.

FORMA

“Así pues, ese conocimiento es siempre el más valioso (...) el que considera las formas simples o las diferencias entre las cosas, cuyo número es limitado, y los grados y coordinaciones a partir de los cuales forman toda su variedad” - Francis Bacon.

Durante el desarrollo de la humanidad, el hombre se ha interesado siempre en las formas naturales, bien sea por su estética y/o por su función. Probablemente el motivo sea la perfección, exactitud y la eficiencia de las composiciones geométricas naturales, siempre sirviendo de la mejor manera para más de una función y construidas bajo configuraciones matemáticas exquisitas. En ellas se presenta lo que para muchos es armonía y, a su vez, generan una satisfacción generalizada en quien las contempla.

En este documento se adopta el campo formal como el análisis de diferentes formas geométricas que adopta la naturaleza, por ejemplo las espirales, las formas sinuosas y ciertas ordenaciones ramificadas, así como la configuración por medio de la cual se generan¹⁰. En esta sección se incluyen tres componentes: los patrones, la relación forma-función y las

¹⁰ STEVENS, Peter (1987), Patrones y pautas en la naturaleza. Barcelona, Salvat Editores.

texturas; unos de los tantos que se podrían desarrollar a través de la aplicación de biomímesis en la generación de formas y geometrías.

Patrones

Todo el Universo y cuanto contiene fue creado por medio de principios básicos: desde la más pequeña partícula, hasta su totalidad, sigue un patrón geométrico. Los diseños que conforman la naturaleza están hechos de formas simples, entre ellas, círculos, cuadrados, triángulos, rombos y demás. La gran variedad de formas se debe a las diferentes configuraciones que se pueden generar a partir de estas formas simples que brindan armonía y belleza al mundo natural¹¹.

Un ejemplo del tema tratado podrían ser los moluscos, presentándose en ellos un patrón formal de crecimiento. La concha de los moluscos está hecha de un material calcificado que, durante su crecimiento, se adiciona continuamente sobre los bordes bajo una configuración en espiral.

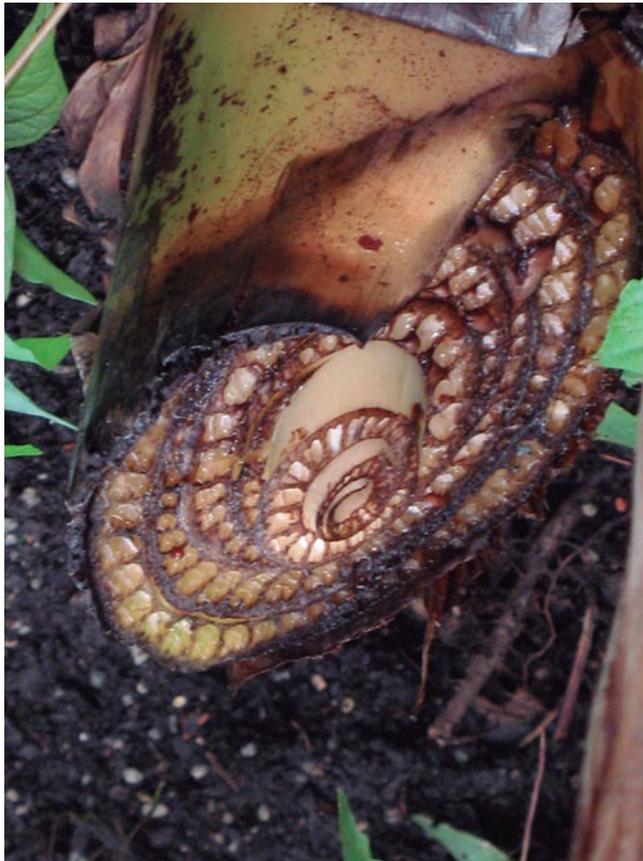


Figura 2. Crecimiento en espiral de una planta de plátano en "Eden Project". Fotografía de Leonardo Moreno de Luca, 2011.

Esta configuración en particular se identificó en innumerables especies, desde pequeñas semillas (como las piñas de los pinos) hasta en el vuelo que describe un ave para atrapar su presa. Lo anterior produjo, de manera intuitiva, un amplio análisis de diferentes naturalistas

11 STEVENS, Peter (1987), Patrones y pautas en la naturaleza. Barcelona, Salvat Editores.

como James Bell Pettigrew y D'arcy Wentworth Thompson quienes descubrieron que dicha espiral se repetía en la naturaleza a diferentes escalas y, que se asociaba con una relación de medida que, poco tiempo después, fue denominada como proporción matemática. Esta proporción había sido trabajada 700 años antes por el matemático Leonardo de Pisa.

En Arquitectura, actualmente, uno de los profesionales que aplica este principio es el Arquitecto e Ingeniero estructural Frei Otto, el cual se inspira en las diatomeas para generar las cubiertas de la mayoría de sus proyectos. Las diatomeas son una especie de algas multicelulares, las cuales presentan una cáscara que puede ser plana, cilíndrica, cupular o alabeada y con un espesor muy reducido. Estos organismos se desarrollan en muy poco tiempo, obtienen su forma definitiva al rigidizarse completamente las superficies de las cáscaras que las conforman, desarrollan varios principios estructurales que pueden soportar diferentes situaciones de carga: de compresión y/o de flexión¹².

Este tipo de solución biomimética se convierte entonces en una propuesta arquitectónica integral donde se optimizan por completo los elementos estructurales y se utiliza únicamente el material necesario. De esta manera se obtiene un lenguaje formal interesante que responde a una función específica.

Forma-Función

“A medida que nuestros modelos matemáticos y nuestras técnicas de fabricación se perfeccionen, cabrá esperar una mayor semejanza entre formas naturales y las estructuras creadas por el hombre” – Peter Stevens.

Uno de los aspectos más fascinantes de la eficiencia de la naturaleza es la relación que se presenta entre las formas y geometrías naturales con la función que debe realizar el organismo o el sistema. De esta manera, dentro de la naturaleza, la forma y la función van siempre de la mano.

El diseño de la terminal TWA en Nueva York¹³ adopta, como fuente de inspiración, el análisis de la forma del fémur humano. El fémur es un hueso en forma de tubo hueco, que se ensancha en su parte superior e inferior, debido a que allí se presenta una concentración mayor de esfuerzos. La naturaleza adiciona material en el área sometida a mayores esfuerzos y mantiene con menor cantidad de material las zonas donde se presentan esfuerzos menores. Debido a la composición ósea, se forma en el fémur un diagrama de líneas a tensión y a compresión, estando éste en función de las determinadas solicitaciones. El diseño de la TWA realiza una analogía de este comportamiento para la generación de la geometría que define los elementos estructurales verticales.

La implementación de estas analogías permite integrar la forma, la función y la técnica en un solo elemento que da como resultado un lenguaje formal inigualable y un rendimiento óptimo. De esta manera se puede hablar de una integralidad en el proyecto arquitectónico, en vez de tener distintos diseños independientes que al final conforman el objeto arquitectónico.

¹² ALBARDANÉ, Francesc (1965), Frei Otto: Spannweiten. Berlin, Verlag Ullstein GmbH.

¹³ Crespo Cabillo, I. (2005), Control gráfico de formas y superficies de transición [tesis doctoral], Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya.

Texturas

Las texturas son el acabado final de la configuración de las formas básicas que conforman los diseños naturales. En esta configuración final se dan múltiples acabados, encontrándose entre ellos las superficies auto-limpiantes¹⁴.

Basándose en estas configuraciones y en el desarrollo de la nano-tecnología, se han presentado propuestas de superficies artificiales auto-limpiantes, inspiradas en la flor de loto, de origen asiático y reconocida por flotar sobre el agua de los estanques. La característica principal que sirvió de inspiración para el diseño de estas superficies es que, a pesar de las condiciones del entorno, las hojas de esta flor siempre se mantienen limpias. Lo anterior debido a que su superficie está compuesta por micro y macro estructuras de cristales de cera natural que crean una superficie en forma de laberinto, impidiendo que la suciedad y el agua se adhieran. De esta manera el agua que cae sobre la hoja se desliza sobre ella limpia la poca suciedad que pueda tener, se genera así un proceso de auto-limpieza.

El instituto AIDIMA¹⁵, encargado de generar estrategias para la reducción de los impactos ambientales que generan nuevos productos creados por algunas empresas europeas, desarrolla varios proyectos de materiales y productos sobre nano-partículas. Uno de ellos, está enfocado en imitar este fenómeno natural de auto-limpieza y, en su posible utilización en nano-revestimientos de materiales, que disminuyan eficazmente la presencia de suciedad en las superficies tratadas y faciliten su limpieza y mantenimiento.

Este tipo de revestimiento reduce los periodos de mantenimiento que se dan tradicionalmente en los revestimientos comunes, prolonga así la durabilidad del material empleado y reduce los fuertes impactos ambientales que producen los detergentes o químicos usados en este fin.



Figura 3. Lillypad en "Eden Project". Fotografía de Leonardo Moreno de Luca, 2011

14 Biomimicry in Action (2009, Julio) Benyus, J., Oxford, TED Talks.

15 "AIDIMA: Instituto tecnológico – mueble, madera, embalaje y afines" [en línea], disponible en: <http://www.aidima.es/>

PROCESOS

A través del desarrollo y evolución de los organismos naturales, la naturaleza ha creado una cantidad innumerable de procesos totalmente eficientes y, por supuesto, sostenibles. Estos procesos tienen, entre sus principios básicos, el uso de los recursos inmediatos disponibles, el uso y la transformación de energía de manera eficiente, la producción por medio de sistemas cerrados, la construcción por medio de auto-ensamblaje y, el uso de la mínima energía posible, entre otros. ¿Qué empresa no estaría interesada en funcionar bajo estos mismos principios?

A continuación se describen algunos de ellos con unas aproximaciones hacia la aplicación en el diseño arquitectónico y estructural.

Aprovechar sosteniblemente las condiciones del entorno

Como se expuso anteriormente, la naturaleza utiliza única y exclusivamente los recursos que tiene a su disposición y, adicionalmente, los utiliza de tal manera que asegura la disponibilidad de estos en el futuro. Es decir, extrae recursos sosteniblemente, al generar un ciclo cerrado donde los “desperdicios” son el insumo para otro proceso.

Se propone entonces realizar una analogía de este principio en la construcción de objetos arquitectónicos, al utilizar únicamente los materiales presentes en la zona de implantación del proyecto, los extra selectivamente y lleva a cabo un proceso constructivo que permite su reintegración a la naturaleza, con el menor impacto posible. Al hacer esto, la contribución sería significativa, desde el punto de vista medio-ambiental, ya que se eliminarían los transportes que son necesarios cuando se utilizan materiales que no se consiguen en la zona del proyecto, se disminuye así la contaminación que producen. Por otro lado, al utilizar los materiales con la menor transformación posible, se podrían devolver (una vez terminada la vida útil del objeto arquitectónico) al medio natural sin causar mayores impactos. Adicionalmente, de seguir con este principio constructivo, se aseguraría la disponibilidad de los materiales de construcción para las generaciones venideras. El resultado sería entonces una disminución de la huella ecológica que produce la construcción y el funcionamiento de un objeto arquitectónico durante su ciclo de vida útil.

Un claro ejemplo es lo realizado por el Arquitecto RobertSomerville¹⁶ en la región de Devon, UK, donde los proyectos que se llevan a cabo cumplen los principios y condiciones anteriores, pues disminuyen en gran medida el impacto ambiental y los costos de construcción.

Flujos, transformación y uso de energía

En cuanto a procesos energéticos, en la naturaleza se presentan ejemplos totalmente eficientes que permiten realizar transformaciones de energía, las cuales son el fundamento de la vida de todos los organismos que habitan en el planeta. Claro ejemplo es la fotosíntesis que utiliza energía lumínica y CO₂ para generar alimento, y oxígeno como resultado del proceso.

¹⁶ “Earth, Oak & Lime: natural building design” [en línea], disponible en: <http://www.earthoaklime.co.uk/>

Como ejemplo de aprovechamiento de energía natural, se presenta lo que lleva a cabo la compañía Whale Power¹⁷, la cual trabaja en el campo de la energía eólica. A esta compañía le llamó la atención la forma en que las ballenas jorobadas se desplazan con gran facilidad por el mar, a pesar de su tamaño, descubrió que gracias a los pequeños forúnculos que se conforman en las aletas de estos mamíferos y a la canalización de sus aletas dorsales, su movimiento es bastante eficiente y mejora sus condiciones aerodinámicas y su estabilidad. Los ingenieros diseñadores replican la forma de la aleta del mamífero y la incorporan en las hélices de los molinos de viento. De esta manera se optimiza (disminuye) la fricción entre las hélices y el viento y, por consiguiente, aumenta la eficiencia en la generación de energía eólica que luego es transformada en energía eléctrica para abastecer, por ejemplo, a un edificio.

La implementación de este proceso en proyectos arquitectónicos puede lograr una autosuficiencia energética. De esta manera se evitaría el consumo de energía convencional al aprovechar, exclusivamente, los distintos factores del medio ambiente, sin afectar su proceso natural. Como resultado consecuente, se reduciría el consumo de energía de la ciudad en donde se implante el objeto arquitectónico.

Control climático

Yiatros et al.¹⁸ proponen un sistema de control climático inspirado en la conducción del agua hacia las hojas de los árboles. Este proceso se lleva a cabo en la naturaleza de la siguiente manera: el agua presente en las hojas se evapora por la incidencia del sol y por distintas condiciones climáticas, al ocurrir esto, deja libre el espacio en donde se encontraba, genera así un vacío el cual succiona paulatinamente el agua que se encuentra en los alrededores inmediatos y, de esta manera, se crea una circulación que permite succionar el agua que ha recolectado el árbol con sus raíces para llevarla hasta las hojas más altas^{19 20}.

El trabajo presentado por Yiatros et al.¹⁸, realiza una analogía de dicho proceso para diseñar un sistema de ventilación en un edificio de oficinas. En este caso, el aire que se encuentra en la periferia del edificio se calienta por medio de la exposición de la fachada al sol. Al calentarse, el aire sube y empieza a salir por una abertura que se encuentra en la cubierta lo que genera un vacío en su ubicación anterior. Este vacío succiona el aire que se encuentra en la parte central del edificio, abastecido por medio de aperturas en cubierta y en fachada. De esta manera se crea una circulación continua que renueva el aire al interior del edificio.

El ejemplo anterior es una muestra clara del funcionamiento y la efectividad de la biomímesis en el proceso de diseño arquitectónico. Se logra solucionar un problema por medio de la analogía de un proceso natural, y se logra de tal manera que la solución no sólo funciona de manera correcta, sino que reduce significativamente el consumo energético que el edificio tendrá durante su vida útil. Por consiguiente, se obtiene un resultado funcional, económico, efectivo y enfocado hacia la preservación del medio-ambiente.

17 "Whale Power: building the energy future on a million years of field tests" [en línea], disponible en: <http://www.whalepower.com/drupal/>

18 Yiatros, S.; Wade, M. y Hunt, G. (2007) "The load-bearing duct: biomimicry in structural design", En: Engineering Sustainability, No. 160, pp.179-188.

19 TYREE, Melvin y ZIMMERMANN, Martin (2002), Xylem Structure and the Ascent of Sap. Berlin, Springer.

20 Tyree, M. (2003) "The ascent of water", En: Nature, No.423, p. 923.

Reciclaje (sistemas cerrados)

Una de las principales causas de los problemas de contaminación y de deterioro de recursos naturales es que la mayoría de los procesos de producción son procesos lineales, en vez de ser circulares o cerrados²¹. Por este motivo, McDonough y Braungart²² exponen en su libro “*Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*”, un proyecto llamado “*The ABLE Project*”²³, el cual está enfocado en un ciclo cerrado de producción que funciona para una granja de pescados. A grandes rasgos, el proyecto funciona de la siguiente manera: se empieza por recoger los desechos de cartón y papel que se generan en un restaurante cuyo plato principal es el pescado, estos desechos se trozan para convertirlos en el material que sirve para cubrir el piso de los establos (hace las veces del tamo). De esta manera se venden a granjas donde crían caballos. Como paso siguiente, se recoge el excremento de los caballos con el fin de usarlo para el desarrollo de una granja de lombrices. Estas lombrices se venden a los criadores de peces, los cuales, a su vez, se venden al restaurante en donde empezó el proceso. De esta manera el ciclo de producción es totalmente cerrado, sin desperdicios y sin contaminación.

Se cree que es posible idear un proceso análogo para el diseño, construcción y funcionamiento de las edificaciones. Podría pensarse en que el ciclo cerrado se diera con base en la energía, y en su transformación, presente en dichos procesos arquitectónicos e ingenieriles. Otra posibilidad, con una analogía más directa, sería pensar en el ciclo que tienen los desechos que se producen en la vida útil de la edificación, con el fin de reusarlos y generar insumos para esta misma. Adicionalmente, se pueden generar ciclos cerrados con el uso del agua dentro de los proyectos arquitectónicos, así no se logre cerrar por completo el ciclo si se reduciría el consumo y protegería así el recurso hídrico.

Auto-Ensamblaje

Skyler Tibbits²⁴, Arquitecto e Ingeniero de Sistemas de MIT, es uno de los mejores referentes encontrados para la aplicación del proceso de auto-ensamblaje en Arquitectura. Plantea que el proceso de auto-ensamblaje está inspirado en el plegamiento de proteínas, en la manera como se doblan para adquirir su estructura tridimensional. Como requerimientos fundamentales para que se pueda llevar a cabo este proceso, es necesario contar con los siguientes aspectos²⁴:

- Secuencia de ensamblaje decodificada
- Partes programables
- Energía de activación
- Corrección de posibles errores

Un ejemplo de este proceso, planteado por Tibbits, es el proyecto “*Self-Assembly Line: From Chaos to Order and Back*”²⁵. El proyecto pretende construir una versión, a gran escala, de módulos auto-ensamblables de virus, como una estructura performativa e interactiva con el usuario. Esto es una instalación que construye instalaciones, en la que el usuario inicia el proceso al rotar (energía de activación) la estructura que encierra las piezas (partes progra-

21 “The Story of Stuff Project” [en línea], disponible en: <http://www.storyofstuff.org/>

22 McDONOUGH, William y BRAUNGART, Michael (2002), *Cradle to Cradle: remaking the way we make things*. New York, North Point Press.

23 “The ABLE Project” [en línea], disponible en: <http://www.theableproject.org.uk/>

24 Can we make things that make themselves? (2011) Tibbits, S., Long Beach, TED Talks.

25 “SJET” [en línea], disponible en: <http://www.sjet.us/>

mables) que constituirán el producto final. De esta manera se cambia la velocidad y dirección del movimiento (secuencia de ensamblaje decodificada y corrección de posibles errores), y se adicionan partes para influenciar el rendimiento del auto-ensamblaje a gran escala.

Podría pensarse, por ejemplo, en aplicar este principio en la fabricación de refugios que sirvan para las situaciones de emergencia causadas por algún fenómeno natural y en las cuales el acceso a la zona sea difícil. El refugio podría estar desarmado, con sus partes programables (piezas) plegadas, y podría llevarse a la zona y lanzarse desde algún medio de transporte aéreo. De esta manera, la energía que se genera en la caída haría las veces de energía de activación y, se esperaría que la corrección de posibles errores se hiciera en la zona donde cae. La anterior sería una idea que cumpliría con los cuatro aspectos necesarios, nombrados con anterioridad, para llevar a cabo un proceso de auto-ensamblaje²⁶.

Transporte de agua

El proceso del transporte de agua está inspirado en el mismo principio descrito en la sección 3.3 Control climático (ver la descripción del funcionamiento de este proceso en dicha sección)^{27 28}.

Se propone, por medio de la utilización de este principio la posibilidad de realizar una analogía mucho más directa que la correspondiente al control climático y, diseñar un sistema de suministro de agua inspirado en dicho proceso natural. De lograrse, no se necesitaría un impulsor mecánico para llevar el agua a lugares con mayor elevación, el único recurso necesario sería la energía del sol que permita evaporar el agua. Es claro que la complejidad de este diseño se aumenta, considerablemente, por la necesidad de generar condiciones de vacío, o por lo menos cercanas al vacío, pero, de igual forma, resultaría una investigación interesante con un potencial posiblemente muy atractivo.

ESTRUCTURA

El diseño estructural es un campo muy promisorio para el desarrollo de investigaciones de aplicación de principios biomiméticos. Esto debido a los innumerables ejemplos de estructuras naturales totalmente eficientes, adaptables y con excelente comportamiento estructural, tanto para cargas dinámicas como para cargas estáticas.

Adicionalmente, la forma cómo se construyen estas estructuras en la naturaleza, resulta ser muy interesante ya que únicamente se emplean materiales degradables que, después de cumplir su función, no dejan ningún tipo de desecho ni huella alguna de contaminación. Por otro lado, la eficiencia de estas estructuras también se da por su proceso constructivo donde, por lo general, siempre se construye monóticamente, en una sola pieza, muy distinto a los procesos constructivos que los arquitectos e ingenieros llevan a cabo.

Las aplicaciones de principios biomiméticos en el diseño estructural, se dividen en el presente trabajo en cuatro grandes grupos (es claro que se pudiese hacer una clasificación distinta, posiblemente más amplia y detallada). A continuación se expone un ejemplo de cada uno de ellos.

26 Can we make things that make themselves? (2011) Tibbits, S., Long Beach, TED Talks.

27 TYREE, Melvin y ZIMMERMANN, Martin (2002), Xylem Structure and the Ascent of Sap. Berlin, Springer.

28 Tyree, M. (2003) "The ascent of water", En: Nature, No.423,p.923.

Rigidez

Un objetivo importante en el diseño estructural es conseguir la mayor rigidez con el menor peso, y esto lo logran hacer las hojas de las plantas por medio de la tensión superficial que ejerce el agua sobre la periferia de las moléculas de estas. Por este motivo una planta hidratada tiene sus hojas en la posición correcta (podría ser horizontal o vertical) con la rigidez necesaria, mientras que una planta con falta de agua, tiene sus hojas marchitas, sin la rigidez suficiente para mantenerse en la posición adecuada.

El grupo Exploration²⁹, dirigido por Michael Pawlyn, tomó este principio y lo convirtió en fuente de inspiración para realizar estructuras que funcionan gracias a la neumática. En este caso, en vez de necesitar agua para producir la tensión necesaria, y así generar la rigidez requerida, se utiliza aire. Como resultado, se diseñaron unas vigas que funcionan bajo este principio. Estos elementos están formados por un tubo cilíndrico de plástico, encargado de proporcionar, por medio de la geometría de su sección transversal, la inercia necesaria para obtener la rigidez requerida; y una espiral metálica de tensión, la cual se ubica de cierta manera para resistir los esfuerzos a tensión que se producen sobre la viga, según tipo de carga y de las condiciones de apoyo.

El resultado de este diseño fue bastante satisfactorio al obtener una viga con un peso despreciable y una rigidez bastante alta, es decir, su relación peso/rigidez es muchas veces más eficiente que la mayoría de los elementos estructurales utilizados en los sistemas constructivos tradicionales.

Figura 4. Mecanismo de rigidización de una hoja de gran superficie en "Eden Project". Fotografía de Leonardo Moreno de Luca, 2011.



29 "Exploration" [en línea], disponible en: <http://www.exploration-architecture.com/>

De seguir este principio, se alcanzaría una de las principales metas del diseño estructural: una estructura con la rigidez suficiente que le permita resistir las condiciones de carga de servicio, dentro de un rango de deformaciones admisibles; y un peso mínimo que disminuya los efectos nocivos de las fuerzas cortantes generadas por la acción de un sismo. Si la masa de la estructura es menor, la fuerza que imprime un sismo sobre la estructura también lo será, $Fuerza = Masa * Aceleración$ (sismo).

Flexibilidad y Adaptación

La flexibilidad en una estructura tiene grandes beneficios si se desea que presente cierta adaptabilidad bajo determinadas condiciones de carga o, alguna situación en particular. En este sentido, se toma lo planteado por Vogel³⁰, en lo referente a la flexibilidad de las hojas de un Tulipero. Las hojas, debido a su flexibilidad, cambian su forma en función de la velocidad del viento. De esta manera, adquieren una determinada geometría para un viento suave (5m/s) y, otra totalmente distinta para un viento más fuerte (20m/s).



Figura 5. Adaptabilidad de un árbol a sus condiciones de carga sin llegar a la falla. Fotografía de Leonardo Moreno de Luca, 2011.

Al observar este principio de flexibilidad y su funcionamiento en la naturaleza, se plantea la idea de llevar a cabo un diseño de cubierta para lugares donde se tengan condiciones adversas de corrientes de viento. Lo que se propone es que la cubierta pueda adaptarse a la condición de viento que se presente y así permita un flujo suave, sin mayores perturbaciones ni obstáculos. Lo anterior está de acuerdo con el segundo principio fundamental que plantea Mathews³¹ para la biomímesis: el principio de la menor resistencia (los organismos y sistemas vivos logran sus metas de manera tal que el gasto generado por sus propios es-

30 VOGEL, Steven (2000), *Cat's Paws and Catapults: mechanical worlds of nature and people*. New York, W.W. Norton & Company.

31 Mathews, F. (2011) "Towards a Deeper Philosophy of Biomimicry", En: *Organization and Environment*, No. 24, pp.364-387.

fuerzas sea el mínimo). Al diseñar una cubierta de esta manera, no se generarían presiones fuertes sobre la misma, las cuales pueden ocasionar daños materiales e incluso pérdida de vidas, situación que se presenta comúnmente.

Otra característica que en ocasiones se busca en una estructura, según la situación, es que se pueda adaptar a unas condiciones de carga o de apoyos que varíen en el tiempo. Éste era uno de los objetivos que se debían lograr en el proyecto “*The Eden Project*”³², localizado en Cornwall, UK, y llevado a cabo por Grimshaw Architects³³.

“*The Eden Project*” debía ser construido sobre una antigua mina de arcilla, situación por la cual se presentaban problemas geológicos bastante importantes ya que, debido a esto, el comportamiento del suelo no es regular y permanece en constante movimiento. Para llegar a una solución, se analizaron las burbujas que forman distintos líquidos con el objetivo de encontrar la inspiración para la forma del edificio, sin importar los niveles finales del terreno. De esta manera se generó una estructura con dicha forma, basada en la estructura de los granos de polen, las radiolarias y las moléculas de carbono, que tiene la capacidad de adaptarse a los movimientos del terreno sin sufrir daños.

Adicionalmente, para generar la superficie de la estructura, se aplicó el mismo principio descrito en la sección de rigidez. Lo anterior a través del uso de membranas presurizadas fabricadas con ETFE, un polímero de alta resistencia. Como resultado, se obtuvo una estructura cuyo peso total es inferior al peso del aire contenido en ésta.

Figura 6. “Eden Project”. Fotografía de Leonardo Moreno de Luca, 2011.



De esta manera, la adaptación se plantea como una característica que permite resolver situaciones dinámicas a las que está expuesta una estructura, como por ejemplo, los sismos y los fenómenos naturales. Se cree que es posible diseñar y construir estructuras que se

32 “Eden Project” [en línea], disponible en: <http://www.edenproject.com/>, recuperado: 26 de Septiembre de 2012.

33 “Grimshaw” [en línea], disponible en: <http://grimshaw-architects.com/>, recuperado: 29 de Septiembre de 2012.

adapten a este tipo de situaciones, en vez de diseñar y construir estructuras rígidas que se enfrenten a situaciones perjudiciales sin poder “esquivarlas”. El resultado sería un mejor rendimiento y, probablemente, una economía en materiales ya que, si la estructura se adapta a las condiciones de carga, se pueden diseñar sus elementos para cada una de estas, en vez de hacerlo para la envolvente de cargas (lo que se hace comúnmente).

Optimización

Aparte de la eficiencia en el comportamiento estructural, la optimización en este campo tiene un valor agregado: el factor económico. Claus Mattheck propone dos métodos para la optimización estructural, el *Computer Aided Optimization (CAO)* y el *Soft Kill Option (SKO)*³⁴. La idea del primero es simular la forma de crecimiento orgánico que ocurre en los materiales naturales. De esta manera se puede evitar la concentración de esfuerzos en los nodos al optimizar la geometría que define su forma. Al no tener dicha concentración de esfuerzos, se podrá reducir la cantidad de material del elemento estructural. El segundo método se basa en extraer el material que está sub-esforzado dentro de un elemento estructural, es decir, el que está sub-utilizado. La naturaleza nunca emplea material de sobra en sus estructuras y esto es lo que quiere lograr Mattheck con los métodos que plantea

Los dos métodos anteriores, por lo general se llevan a cabo con la ayuda de algoritmos evolutivos^{35 36} y el Método de Elementos Finitos (FEM)³⁷.

La computación evolutiva, donde se ubican los algoritmos evolutivos, es una técnica moderna de búsqueda basada en modelos computacionales que se desarrollan por medio de un algoritmo, el cual se fundamenta y toma conceptos y mecanismos de los procesos de evolución y selección natural. Dichos conceptos y mecanismos son codificados en el algoritmo y utilizados para resolver problemas en muchos campos de la ingeniería y la ciencia³⁸.

Los algoritmos evolutivos son clasificados en tres grandes ramas de desarrollo³⁸:

- Estrategias de evolución (ES)^{38 39}
- Programación evolutiva (EP)⁴⁰
- Algoritmos genéticos (GA's)⁴¹

Desde el punto de vista de la Ingeniería, la computación evolutiva puede entenderse como un proceso de búsqueda y optimización en el cual una población de soluciones lleva a cabo una serie de cambios graduales. Este proceso va a depender de un valor de idoneidad o *fitness* asignado a cada solución, el cual es definido por el entorno (una función objetivo). A continuación se plantean los pasos para llevar a cabo el desarrollo de un Algoritmo Evolutivo (EA) genérico³⁸:

34 MATTHECK, Claus (1998), *Design in Nature*. Berlin, Springer-Verlag.

35 SIVANANDAM, S.N. y DEEPA, S.N. (2012), *Introduction to Genetic Algorithms*. Berlin, Springer-Verlag.

36 COELLO, Carlos; LAMONT, Gary y VAN VELDHIJZEN, David (2007), *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. New York, Springer Science+Business Media.

37 CHANDRUPATLA, Tirupathi y BELEGUNDU, Ashok (2002), *Introduction to Finite Elements in Engineering*. New Jersey, Prentice-Hall.

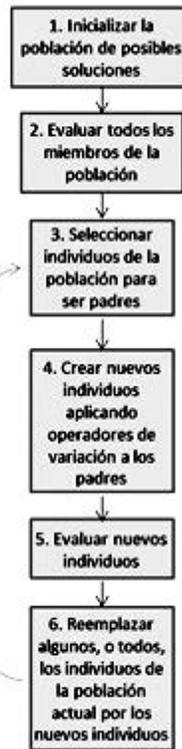
38 Kicinger, R.; Arciszewski, T. y De Jong, K. (2005) "Evolutionary computation and structural design: A survey of the state-of-the-art", En: *Computers and Structures*, No.83, pp. 1943-1978.

39 Schwefel, H.P. (1965), *Kybernetische Evolution als Strategie der experimentellen Forschung in der Stromungstechnik* [Tesis de Maestría], Berlín, Hermann Fottinger Institute for Hydrodynamics, Technical University of Berlin.

40 FOGEL, Lawrence Jerome; OWENS, Alvin J. y WALSH, Michael John (1966), *Artificial Intelligence through simulated evolution*. Chichester, UK, John Wiley.

41 HOLLAND, John H. (1975), *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor, MI, University of Michigan Press.

Figura 7. Procedimiento de un Algoritmo Evolutivo genérico. Fuente. Elaborada por los autores y fundamentada por lo expuesto en: Kicinger, R.; Arciszewski, T. y De Jong, K. (2005) "Evolutionary computation and structural design: A survey of the state-of-the-art", En: Computers and Structures, No.83, pp.1943-1978. Suministrada por los autores.



Los pasos del 3 al 6 se repiten hasta llegar al criterio de parada, asumido que puede ser un número determinado de generaciones, alcanzar una idoneidad requerida, o llegar a la convergencia de las soluciones (cuando la diferencia entre ellas es mínima o nula).

Por medio de este tipo de métodos se han creado diseños interesantes como la silla "bone chair" de Joris Laarman Lab⁴² y distintos tipos de vigas⁴³, entre muchos otros elementos estructurales y objetos. Algunas aplicaciones en el diseño estructural se pueden encontrar en^{44 45 46 47}; mientras que algunas aplicaciones en arquitectura pueden verse en^{48 49 50 51}.

42 "Joris Laarman Lab" [en línea], disponible en: <http://www.jorisaarman.com/>, recuperado: 22 de Agosto de 2012.

43 Wang, S.; Lim, K.; Khoo, B. y Wang, M. (2007) "An extended level set method for shape and topology optimization", En: Journal of Computational Physics, No.221, pp. 395-421.

44 Noilubla, N. y Bureerat, S. (2011) "Simultaneous topology, shape and sizing optimization of a three-dimensional slender truss tower using multi-objective evolutionary algorithms", En: Computers and Structures, No.89, pp.2531-2538.

45 Winslow, P.; Pellegrino, S. y Sharma, S.B. (2010) "Multi-objective optimization of free-form grid structures", En: Struct Multidisc Optim, No. 40, pp.257-269.

46 Coello, C.A. y Christiansen, A.D. (2000) "Multiobjective optimization of trusses using genetic algorithms", En: Computers and Structures, No.75, pp.647-660.

47 Li, G.; Zhou, R.G.; Duan, L. y Chen, W.F. (1999) "Multiobjective and multilevel optimization for steel frames", En: Engineering Structures, No.21, pp.519-529.

48 Gaspar-Cunha, A.; Loyens, D. y Van Hattum, F. (2011) "Aesthetic Design Using Multi-Objective Evolutionary Algorithms", En: EMO'11 Proceedings of the 6th International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, Heidelberg, Springer-Verlag, pp. 374-388.

49 Gagne, J.M.L. y Andersen, M. (2010) "Multi-objective facade optimization for daylighting design using a Genetic Algorithm", En: Proceedings of SimBuild 2010 - 4th National Conference of IBPSA-USA.

50 Wang, W.; Rivard, H. y Zmeureanu, R. (2006) "Floor shape optimization for green building design", En: Advanced Engineering Informatics, No.20, pp.363-378.

51 Fialho, A.; Hamadi, Y. y Schoenauer, M. (2011) "Optimizing Architectural and Structural Aspects of Buildings towards Higher Energy Efficiency", En: Proceedings of the 13th Annual Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation GECCO'11, New York, ACM, pp.727-732.

Adicionalmente, se han llevado a cabo aplicaciones de computación evolutiva que pretenden integrar el diseño estructural con el arquitectónico, algunas de ellas pueden encontrarse en^{52 53 54 55}.

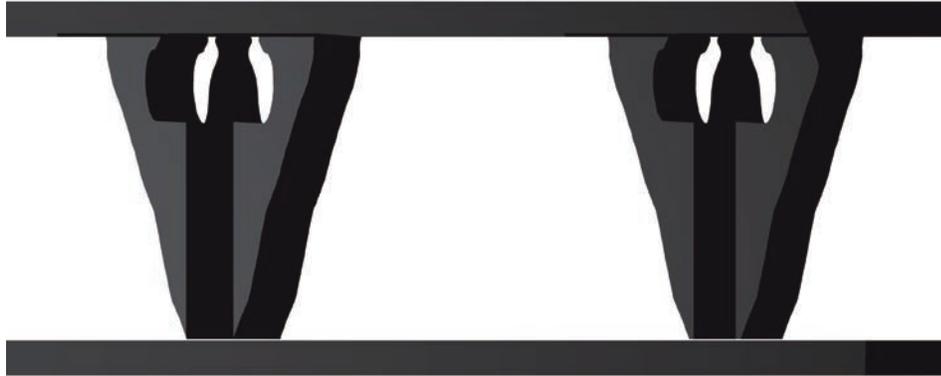


Figura 8A. Optimización por medio del método SKO de una estructura en 2D para resistir una carga vertical uniformemente distribuida. Elaboración de los autores.

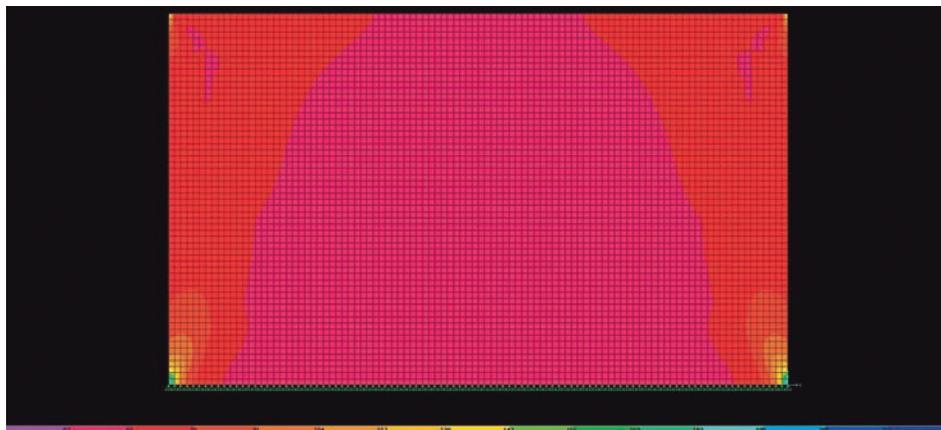


Figura 8B. Diagrama de esfuerzos de von Mises en la optimización de la anterior estructura. Elaboración de los autores

De igual forma, por medio de la computación evolutiva se pueden crear procesos de morfogénesis. De esta manera, por medio de un proceso de optimización, que puede ser de un solo objetivo o multi-objetivo, la forma del elemento arquitectónico, o de la totalidad del objeto arquitectónico, se crea en función de los objetivos que se desean alcanzar por medio del proceso de optimización. Ejemplos de lo anterior se pueden encontrar en^{56 57}.

52 Pugnale, A. y Sassone, M. (2007) "Morphogenesis and structural optimization of shell structures with the aid of a Genetic Algorithm", En: Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, No.48, pp.161-166.

53 Sassone, M. y Pugnale, A. (2008) "Optimal design of glass grid shells with quadrilateral elements by means of a genetic algorithm", En: Proceedings of the 6th International Conference on Computation of Shell and Spatial Structures IASS-IACM 2008: Spanning Nano to Mega.

54 Sassone, M.; Méndez, T. y Pugnale, A. (2008) "On the interaction between architecture and engineering: the acoustic optimization of a reinforced concrete shell", En: Proceedings of the 6th International Conference on Computation of Shell and Spatial Structures IASS-IACM 2008: Spanning Nano to Mega.

55 Byrne, J.; Fenton, M.; Hemberg, E.; McDermott, J.; O'Neil, M.; Shotton, E. y Nally, C. (2011) "Combining structural analysis and multi-objective criteria for evolutionary architectural design", En: Applications of Evolutionary Computation, pp.204-213.

56 Pugnale, A. y Sassone, M. (2007) "Morphogenesis and structural optimization of shell structures with the aid of a Genetic Algorithm", En: Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, No. 48, pp.161-166.

57 Sassone, M.; Méndez, T. y Pugnale, A. (2008) "On the interaction between architecture and engineering: the acoustic optimization of a reinforced concrete shell", En: Proceedings of the 6th International Conference on Computation of Shell and Spatial Structures IASS-IACM 2008: Spanning Nano to Mega.

En síntesis, la optimización en los procesos de diseño arquitectónicos y estructurales, por medio de la computación evolutiva, permite llegar a soluciones eficientes, desde todos los puntos de vista que se desee, y, simultáneamente, le permite al diseñador llevar a cabo una exploración estética mucho más amplia que la que se lleva a cabo en los procesos de diseño tradicionales. Por otro lado, al generar un proceso de morfogénesis, se vinculan directamente la forma y la función que resuelve uno de los principales dilemas que se ha presentado en la arquitectura en las últimas décadas.

Estructuras jerárquicas

Una de las principales características de las estructuras naturales es que se construyen con distintos niveles de jerarquía. Esto se puede observar al analizar con detenimiento un hueso, o la estructura de una esponja de mar, por ejemplo. Estas estructuras están constituidas por pequeñas fibras que forman fibras más grandes, y así sucesivamente hasta formar la totalidad del elemento. Estos niveles de formación (en donde ocurre un cambio de escala) tienen el nombre de niveles jerárquicos, o de jerarquía.

Es muy distinta la situación y el concepto presente en la configuración estructural de las edificaciones tradicionales donde, por lo general, se tiene 1 nivel de jerarquía (por ejemplo los pórticos en concreto) o por mucho 2 (cerchas metálicas). De poder aplicar más niveles jerárquicos, la ganancia que tendría la estructura sería significativa, tanto en su comportamiento estructural, como en el costo económico (analizando exclusivamente la cantidad de material).

El comportamiento estructural se mejoraría debido a que se modificaría el modo de falla de la estructura, es decir, en vez de empezar la falla por un elemento (por ejemplo, una viga o columna) y expandirse al resto de la estructura en un tiempo relativamente corto, la falla empezaría por algún elemento del nivel jerárquico inferior (los elementos más pequeños), se expandiría por éste y, de continuar, seguiría al siguiente nivel de jerarquía y así sucesivamente. Al ocurrir esto, se va a disipar energía con cada falla que se produzca, de esta manera la energía disipada será mucho mayor a la correspondiente en una estructura con un solo nivel jerárquico. Es más, puede suceder que, debido al incremento en la energía disipada sobre la estructura con varios niveles de jerarquía, no se llegue al colapso. En cuanto a la cantidad de material, es claro que se reduciría ya que no se tendrían elementos macizos sino una sucesión de elementos que cambian de tamaño y generen así vacíos significativos donde anteriormente se encontraba material.

¿Por qué no utilizar este principio estructural en el diseño de las estructuras civiles actuales? Es claro que la aplicación de este principio incrementaría la complejidad en la construcción de dichas estructuras, pero hoy en día se cuenta con herramientas tecnológicas de diseño y fabricación digital, como las CNC (máquinas de corte por control numérico), que harían posible su construcción. También sería posible pensar en un equilibrio entre el nivel jerárquico, y por consiguiente de optimización, y la complejidad en la construcción, de esta manera se podrían hacer estructuras con 3 o 4 niveles jerárquicos (en vez de pretender llegar a los 8 que presenta por lo general la naturaleza), con una complejidad moderada en su ejecución. Adicionalmente, vale la pena resaltar que actualmente, por lo general, se construye del mismo modo tradicional que se utilizaba hace 30 o 40 años. Lo que se plantea entonces es que se apliquen principios como el expuesto en esta sección que, por medio de las nuevas tecnologías de fabricación digital, permitan crear una nueva forma

de diseñar y construir, más eficiente y óptima y con posibilidades de exploración plástica mucho más amplias.

Para concluir, uno de los pocos ejemplos, y uno de los más representativos del uso de niveles jerárquicos en estructuras civiles, es la Torre Eiffel que presenta en promedio 3 niveles de jerarquía.



Figura 9. Torre Eiffel. Fotografía de Daniel Moreno de Luca. Suministrada por los autores.

CONCLUSIONES

Son innumerables las aplicaciones que puede llegar a tener la biomímesis en la Arquitectura y en la Ingeniería Civil, así como en muchas otras disciplinas. Lo que se debe hacer es identificar de forma correcta la necesidad o el problema que se desea resolver y, saber mirar a la naturaleza para encontrar en ella las respuestas. El Maestro Gaudí decía: “(...) es la naturaleza quien da las mejores soluciones. Es cuestión de saber mirar (...)”⁵⁸.

Por otro lado, aplicar principios naturales en el diseño arquitectónico y estructural debería ser un procedimiento lógico ya que la naturaleza ha probado e investigado soluciones por miles de millones de años y, mejor aún, comprueba su funcionamiento por medio de la práctica. ¿Por qué no abstraer ese conocimiento e implementarlo para crear soluciones mucho más eficientes, sostenibles y con un valor formal seguramente más interesante que el de los proyectos contemporáneos?

Es evidente que la aplicación de dichos principios naturales en el diseño y construcción de objetos arquitectónicos resultaría en ganancias para todos los actores directos e indirectos del proyecto arquitectónico. Los diseñadores tendrían distintas soluciones eficientes,

58 MARTÍN, Esteban y CARRANZA, Andreu (2007), La Clave Gaudí. Bogotá, Random House Mondadori.

funcionales y con alto potencial estético al alcance de la mano; los constructores tendrían soluciones económicas e innovadoras; y los usuarios tendrían soluciones de alto rendimiento, confort y seguridad, así como económicas, durante la vida útil del objeto arquitectónico.

La invitación es, entonces, a mirar con humildad el catálogo de soluciones que la naturaleza expone y mejora día a día, con el fin de acercarnos al desarrollo de objetos arquitectónicos innovadores, creativos, eficientes, tecnológicos y formalmente atractivos.

“La perfección es una antigua aspiración del hombre y el techo de esa perfección es la propia naturaleza. Nada tan perfecto como ella”
Leonardo Da Vinci.

BIBLIOGRAFÍA

ALBARDANÉ, Francesc (1965), *Frei Otto: Spannweiten*. Berlin, Verlag Ullstein GmbH.

BENYUS, Janine (1997), *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. New York, Harper Perennial.

BYRNE, J.; Fenton, M.; Hemberg, E.; McDermott, J.; O’Neil, M.; Shotton, E. y Nally, C. (2011) “Combining structural analysis and multi-objective criteria for evolutionary architectural design”, En: *Applications of Evolutionary Computation*, pp.204-213.

CHANDRUPATLA, Tirupathi y BELEGUNDU, Ashok (2002), *Introduction to Finite Elements in Engineering*. New Jersey, Prentice-Hall.

COELLO, C.A. y Christiansen, A.D. (2000) “Multiobjective optimization of trusses using genetic algorithms”, En: *Computers and Structures*, No.75, pp. 647-660.

COELLO, Carlos; LAMONT, Gary y VAN VELDHUIZEN, David (2007), *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. New York, Springer Science+Business Media.

CRESPO CABILLO, I. (2005), *Control gráfico de formas y superficies de transición* [tesis doctoral], Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya.

FIALHO, A.; Hamadi, Y. y Schoenauer, M. (2011) “Optimizing Architectural and Structural Aspects of Buildings towards Higher Energy Efficiency”, En: *Proceedings of the 13th Annual Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation GECCO’11*, New York, ACM, pp.727-732.

FOGEL, Lawrence Jerome; OWENS, Alvin J. y WALSH, Michael John (1966), *Artificial Intelligence through simulated evolution*. Chichester, UK, John Wiley.

GAGNE, J.M.L. y Andersen, M. (2010) “Multi-objective facade optimization for daylighting design using a Genetic Algorithm”, En: *Proceedings of SimBuild 2010 - 4th National Conference of IBPSA-USA*.

GASPAR-CUNHA, A.; Loyens, D. y Van Hattum, F. (2011) "Aesthetic Design Using Multi-Objective Evolutionary Algorithms", En: EMO'11 Proceedings of the 6th International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, Heidelberg, Springer-Verlag, pp.374-388.

HOLLAND, John H. (1975), *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor, MI, University of Michigan Press.

KICINGER, R.; Arciszewski, T. y De Jong, K. (2005) "Evolutionary computation and structural design: A survey of the state-of-the-art", En: Computers and Structures, No.83, pp.1943-1978.

LI, G.; Zhou, R.G.; Duan, L. y Chen, W.F. (1999) "Multiobjective and multilevel optimization for steel frames", En: Engineering Structures, No.21, pp.519-529.

MARTÍN, Esteban y CARRANZA, Andreu (2007), *La Clave Gaudí*. Bogotá, Random House Mondadori.

MATHEWS, F. (2011) "Towards a Deeper Philosophy of Biomimicry", En: Organization and Environment, No.24, pp.364-387.

MATTHECK, Claus (1998), *Design in Nature*. Berlin, Springer-Verlag.

McDONOUGH, William y BRAUNGART, Michael (2002), *Cradle to Cradle: remaking the way we make things*. New York, North Point Press.

NEUROHR, R. y Dragomirescu, C. (2007) "Bionics in engineering – defining new goals in engineering education at politehnica University of Bucharest", En: International Conference on Engineering Education – ICEE 2007. Coimbra, Portugal.

NOILUBLAO, N. y Bureerat, S. (2011) "Simultaneous topology, shape and sizing optimization of a three-dimensional slender truss tower using multiobjective evolutionary algorithms", En: Computers and Structures, No.89, pp.2531-2538.

PUGNALE, A. y Sassone, M. (2007) "Morphogenesis and structural optimization of shell structures with the aid of a Genetic Algorithm", En: Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, No.48, pp.161-166.

RECHENBERG, I. (1965), *Cybernetic solution path of an experimental problem* [Library Translation 1122], Farnborough, UK, Royal Aircraft Establishment.

SASSONE, M. y Pugnale, A. (2008) "Optimal design of glass grid shells with quadrilateral elements by means of a genetic algorithm", En: Proceedings of the 6th International Conference on Computation of Shell and Spatial Structures IASS-IACM 2008: Spanning Nano to Mega.

SASSONE, M.; Méndez, T. y Pugnale, A. (2008) "On the interaction between architecture and engineering: the acoustic optimization of a reinforced concrete shell", En: Proceedings of the 6th International Conference on Computation of Shell and Spatial Structures IASS-IACM 2008: Spanning Nano to Mega.

SCHWEFEL, H.P. (1965), *Kybernetische Evolution als Strategie der experimentelen Forschung in der Stromungstechnik* [Tesis de Maestría], Berlín, Hermann Fottinger Institute for Hydrodynamics, Technical University of Berlin.

SIVANANDAM, S.N. y DEEPA, S.N. (2012), *Introduction to Genetic Algorithms*. Berlin, Springer-Verlag.

STEVENS, Peter (1987), *Patrones y pautas en la naturaleza*. Barcelona, Salvat Editores.

TÁRRECH, Armand Puig (2011), *La Sagrada Familia según Gaudí*. Barcelona, El Aleph Editores.

TURNER, J. y Soar, R. (2008) "Beyond Biomimicry: What termites can tell us about realizing the living building", En: First International Conference on Industrialized, Intelligent Construction – I3CON. Leicestershire, UK.

TYREE, M. (2003) "The ascent of water", En: Nature, No.423, p.923.

TYREE, Melvin y ZIMMERMANN, Martin (2002), *Xylem Structure and the Ascent of Sap*. Berlin, Springer.

VINCENT, J. (2006) "Applications: Influence of Biology on Engineering", En: Journal of Bionic Engineering, No.3, pp.161-177.

VOGEL, Steven (2000), *Cat's Paws and Catapults: mechanical worlds of nature and people*. New York, W.W. Norton & Company.

WANG, S.; Lim, K.; Khoo, B. y Wang, M. (2007) "An extended level set method for shape and topology optimization", En: Journal of Computational Physics, No.221, pp.395-421.

WANG, W.; Rivard, H. y Zmeureanu, R. (2006) "Floor shape optimization for green building design", En: Advanced Engineering Informatics, No.20, pp.363-378.

WINSLOW, P.; Pellegrino, S. y Sharma, S.B. (2010) "Multi-objective optimization of free-form grid structures", En: Struct Multidisc Optim, No.40, pp.257-269.

YIATROS, S.; Wadee, M. y Hunt, G. (2007) "The load-bearing duct: biomimicry in structural design", En: Engineering Sustainability, No.160, pp.179-188.