

MORFOGÉNESIS NATURAL COMO METODOLOGÍA EN LOS PROCESOS DE DISEÑO ARQUITECTÓNICO

*Natural morphogenesis as methodology in architectural
design processes*

ARQ. RAÚL MOLINA RIVERA
Maestría en Diseño Arquitectónico
Universidad De La Salle Bajío, México
arq.raul24@gmail.com

ARQ. RENE AZCARY FERNÁNDEZ MAGALLÓN
Maestría en Diseño Arquitectónico
Universidad De La Salle Bajío, México
rene@ascary.com.mx

Fecha de recibido: 24 diciembre 2013
Fecha de aceptado: 2 mayo 2014

pp: 21-36



FAD | UAEMéx | Año 9, No 16
Julio - Diciembre 2014

RESUMEN

En la búsqueda de formas inéditas de desempeño y funcionalidad en la arquitectura, nuevas fronteras del diseño, fundadas en modelos ecológicos, se están desarrollando y deben ser investigadas. Las nuevas direcciones de la proyección arquitectónica están comenzando a emerger como originales planteamientos del diseño arquitectónico que van desde posibles soluciones sostenibles hasta las interpretaciones de carácter especulativo. En este contexto, el término “morfogénesis” se empieza a acuñar como la representación, en dicha investigación, de formas de la naturaleza y sus parámetros de creación, provocando a su vez el desarrollo de metodologías transdisciplinarias apoyadas en los procesos responsables de la edificación física de toda la variedad de formas vivas e inanimadas presentes en la naturaleza y que requieren de nuevas tecnologías para su manejo, así, la morfogénesis se apoya en el diseño paramétrico como una herramienta para lograr manejar estas nuevas propuestas.

Palabras clave: bio-inspiración, biomímesis, diseño arquitectónico, morfogénesis.

ABSTRACT

In the search for new forms of performance and functionality in architecture, new frontiers of design, based on ecological models are being developed and should be investigated. The new directions in architectural design are beginning to emerge as original architectural design approaches, ranging from possible sustainable solutions to speculative interpretations. In this context the term Morphogenesis begins to mint as representing the study of natural forms and formation parameters, in turn causing the development of transdisciplinary methodologies supported by the physical processes responsible for the construction of the full range of living and inanimate forms, present in nature and require new technologies for handling and Morphogenesis relies on parametric design as a tool for managing these new proposals.

Key words: bio-inspiration, biomimicry, architectural design, morphogenesis.

INTRODUCCIÓN

El sistema de percepción del hombre está condicionado a todos los elementos que rodean su universo conocido, esto porque no puede concebir formas que no sean productos de las visualizaciones y conocimientos adquiridos con anterioridad, sin embargo, existió un punto de quiebre, donde los arquitectos perdimos la perspectiva de este sistema, diseñando elementos que se excluyen de la naturaleza como sistemas artificiales que reniegan el origen connatural de su concepción morfológica.

Si enfocamos la vista en técnicas pasadas, podremos darnos cuenta de cómo los maestros constructores cimentaron una gran parte de sus ideas gracias al contexto, mucho antes de que los términos *bioinspiration* o biomimesis se introdujeran en el diseño, probablemente por medio de descubrimientos fortuitos en la observación de su entorno, no obstante, luego fueron reemplazados gradualmente por un enfoque sistemático de aplicaciones técnicas basadas en prueba y error que han evolucionado por medio de la comprensión humana en la aplicación del estudio de los organismos naturales, concediendo un campo de gran amplitud en el diseño arquitectónico, enraizado en los principios de biomimetismo, pero innovado con tecnologías hechas por el hombre.

La técnica constructiva marcaba los límites para los primeros proyectistas; maestros artesanos de las edificaciones que transmitían el conocimiento constructivo, basado en observación, prueba y error, de generación en generación y de forma paulatina hasta tiempos modernos. En la actualidad, los adelantos en diferentes disciplinas como la informática, las matemáticas, la biología, la ingeniería y otras ciencias integrales de la arquitectura, hacen posible la tecnología necesaria para proyectar con metodologías que utilizan procesos de desarrollo morfológico de la naturaleza, ayudando a posibilitar mayores soluciones estructurales.

LA NATURALEZA COMO MODELO

¿Cómo emerge la forma arquitectónica?

Necesita de una sustentación teórica metodología que responde a las necesidades espaciales planteadas por un problema de habitabilidad a resolver.

¿Cómo surge la forma de los objetos naturales?

Las formas naturales poseen funciones colectivas no lineales que representan las soluciones de las necesidades a las que se enfrenta el sistema natural, pero plantea sólo los lineamientos a seguir para

su solución y no representa una restricción, sino por el contrario, establece la solución colectiva que cada parte del método aplica de forma individual con ligeras modificaciones según su condición dentro del sistema integral, siempre de forma armónica con la técnica total, como respuesta a las exigencias funcionales y adaptativas que la naturaleza impone.

Cada especie ostenta características particulares que la diferencian de las otras por medio de una lógica de crecimiento, desarrollo y evolución, dando como resultado la forma coherente que manifiesta cada uno de los seres naturales. Esa coherencia es el resultado de que todo armoniza con el sistema natural que integra; en relación sistémica de lo básico y su estructura total.

Desde que la morfogénesis se planteó y utilizó en la indagación y generación de propuestas de las reglas del proceso conceptual arquitectónico, sirvió como un filtro de lo servible y creó un balance que facilita la transferencia de morfologías naturales a la arquitectura, resultando en un diseño conceptual que es extremadamente apropiado en su morfología funcional, ya que parte del sistema que podríamos definir como un empirismo natural.

El análisis de la morfogénesis natural es un estudio realizado de forma inversa al procedimiento del cual estamos acostumbrados: mientras que la forma de proyectar de los diseñadores arquitectónicos está argumentada por medio de investigaciones que resuelven los espacios, partiendo del planteamiento de un problema o necesidad, para el modelo de estudio de la indagación en la disertación natural es contrario; la solución del problema ya está establecida en un modelo natural y es la pauta inicial para el análisis de los sistemas naturales.

La problemática ya está descifrada, ahora tenemos que encontrar cuál es el dilema que está aclarando y tomar esa solución como métodos configurables en el proceso de diseño para su aplicación.

Debido a estos antecedentes, los científicos de diversas disciplinas, como la medicina, ingeniería y la tecnología de nuestra época, han creado procedimientos artificiales que analizan funciones de los sistemas naturales, siendo la biomimesis la más referenciada. La biomimesis implica el uso de las ideas de la naturaleza para seguir los métodos que dan principio a las formas naturales, pero debemos tener en cuenta que las estrategias de diseño biológicas no son inmediatamente aplicables al diseño; problemáticas espaciales, de escala y físicos, hacen requerir de una cuidadosa investigación de los sistemas biológicos que sirven como modelo para procesos estratégicos de diseño, basados en la morfología natural.

Como resultado de las investigaciones de la biomimesis, conseguimos descifrar modelos de patrones que permiten ser tomados para el

desarrollo de procesos análogos, mecanismos que se pueden traducir en una metodología de investigación para la experimentación fenomenológica natural de auto-formación y auto-organización. Haciendo necesario establecer reglas y parámetros que nos permitan plantear la manipulación de este método mediante un sistema que trabaje con información variable para que su transferencia tecnológica pueda ser aplicada en la génesis arquitectónica.

Más allá de lo impresionante que pueda parecer la diversidad de patrones tanto en sistemas orgánicos como inorgánicos, debemos apuntar que su sola observación nos lleva invariablemente a preguntarnos cuál es su origen, expresado en otras palabras, al estudio de la morfogénesis (Sánchez, 2006).

DISEÑO GENERATIVO BASADO EN PARÁMETROS NATURALES

El Diseño Generativo se trata de un proceso que funciona mediante la introducción de parámetros variables para producir geometrías complejas, poniendo más atención en la planeación del sistema para resolverlo que en el resultado, ya que este mismo mecanismo nos mostrará la mejor solución para resolver el dilema por medio de la gestión manipulada de parámetros. Es un método evaluador de geometrías que funciona por medio de la decodificación de la morfogénesis que se almacena en la programación genética de los cuerpos naturales, reinterpretando los patrones morfológicos naturales de los aspectos físicos como parámetros de los diseños arquitectónicos.

Todo este sistema funciona con datos paramétricos finitos, guiados por un algoritmo que dirige la población de formas. Si tomamos como rangos los códigos que aplica la naturaleza para cada objeto natural, estaremos ocupando este sistema, que no trata de crear recetas para la proyección arquitectónica, sino de desarrollar procesos asentados en estrategias dinámicas de diseño que ayuden en la proyección de geometrías automáticas, justificadas por los parámetros naturales con la opción de realizar nuevas entradas artificiales por medio de la inserción de parámetros variables, aprovechando el dinamismo del sistema.

Para definir los patrones que resulten en un algoritmo que pueda ser utilizado en una metodología de diseño, es imperioso hallar la generación del orden paramétrico natural. Este proceso debe ser realizado como la generación de un precepto representado por los patrones de diseño, basado en reglas morfológicas y manipulado por el diseñador que da forma a la conceptualización generativa mediante la introducción de los patrones provenientes de reglas genéticas, interactivas y generativas.

Debido a las crecientes y variadas necesidades de los usuarios, resultado del aumento de la población mundial, que ya ha superado los 7 mil millones de habitantes y la consolidación de las diferentes

culturas, los diseñadores arquitectónicos como creadores de modelos espaciales debemos ser capaces de describir geometrías complejas y variadas mediante un pequeño número de datos alterables (parámetros) que pueden ser directamente maniobrables, esto hace que los modelos basados en parámetros naturales puedan funcionar con una cantidad pequeña de variables que afecten al resto del sistema en un resultado predecible, ya que se encuentra interconectado como un sistema integral.

La ventaja del enfoque del diseño generativo paramétrico es que permite como aspecto primordial, flexibilidad en todos los niveles del proceso metodológico, autorizando adaptación funcional y reestructuración de los parámetros morfológicos, pero para llegar a esto, antes tenemos que identificar las pautas de diseño del objeto natural que tomamos como ejemplo y punto de partida.

Cuando los arquitectos y los diseñadores nos enfrentamos a modelos y sistemas sumamente complejos, provenientes del proceso generativo, nos vemos en la necesidad de limitar nuestros modelos experimentales a prototipos sencillos, cercando la búsqueda de formas resultantes a pocas soluciones que podamos manipular, como resultado de las limitaciones materiales y temporales pero los patrones complejos generados por reglas interactivas son más interesantes y plantean la posibilidad de ver todo orden como el producto de un proceso generativo medible. Esto podría darnos una visión general del orden de cualquier sistema producido por reglas morfológicas, generativas e interactivas (Stratil, 2009).

¿Qué pasa cuando los métodos y sistemas de alta complejidad son extraordinarios para la concepción de la mente humana? ¿Cómo podemos manipular mecanismos superiores a los límites del proceso mental del hombre? Estas son preguntas que muestran la exigencia de nuevas herramientas para facilitar e incrementar el proceso de nuevas concepciones morfológicas.

EXPERIMENTACIÓN MORFOLÓGICA DIGITAL

Durante la historia de la arquitectura y las artes en general, los nuevos medios siempre se han puesto en tela de juicio al momento de proponer distintas formas de representar, visualizar y diseñar un proyecto (Ogino, 2010) pero cuando los enfoques de diseño generativo contemporáneo representan para sus adeptos una dificultad para conceptualizar los sistemas debido a su elevada complejidad, se hace necesario el uso de herramientas avanzadas dinámicas, que no solamente limiten su función a la mera representación gráfica, sino que también interactúen con la interpretación y transformación de información engorrosa, para realizar modelos digitales obtenidos de los parámetros de la estructuración previa del arquetipo generativo.

La era digital, iniciada hace poco más de 30 años propone nuevos paradigmas, no sólo en la representación, sino también en cómo hacer arquitectura. Lo digital propuso una nueva forma de graficar los proyectos de arquitectura, de ahí pasó el modelado espacial, para asociar, en la actualidad, los conceptos de “información” y “parámetros” a varias formas de desarrollo proyectual (Ogino, 2010), como resultado de esto, en la última década, los softwares comerciales de simulación como Rhinoceros y Grasshopper, que trabajan con información y datos, se están empleando cada vez más en la exploración del diseño generativo, porque son la herramienta idónea para realizar modelos digitales de manera más rápida y eficiente, concediendo al diseñador poder vislumbrar un panorama, en teoría, infinito de configuraciones físicas, en donde cualquier geometría puede ser generada por el software de modelado paramétrico.

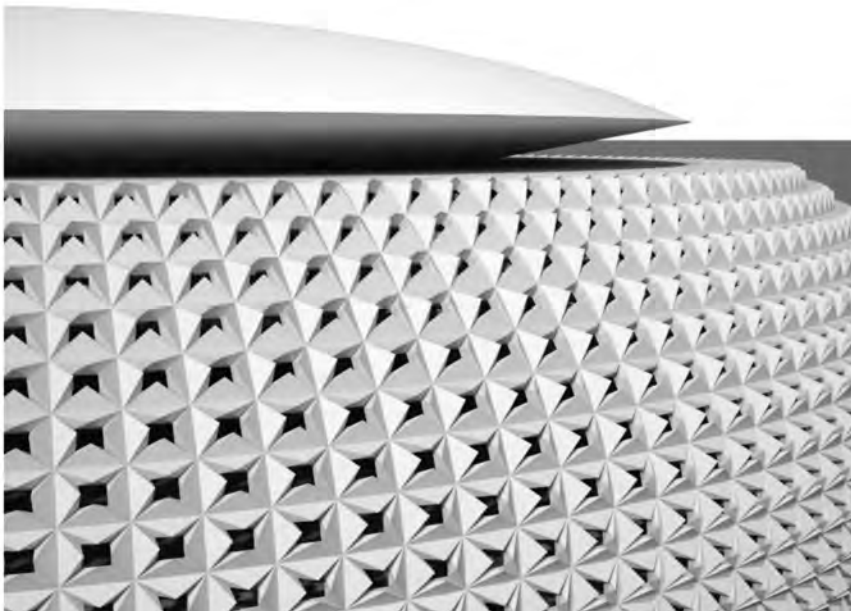


Imagen 1. Las herramientas tecnológicas dan rapidez en la concepción digital de la forma (tomada de un ejercicio de elaboración paramétrica propia). Fuente: Elaboración propia.

Estos programas funcionan desechando toda figura que no cumpla con los parámetros propuestos y, en cambio, desarrolla configuraciones que encajan en ellos, posibilitando la exploración y la optimización de la geometría mediante la modificación veloz de cuantiosos datos paramétricos en tiempo real, creando múltiples opciones de diseño dentro de una estructura predefinida en el diseño generativo.

El software de modelado utiliza el algoritmo del diseño generativo para guiar a la población de soluciones en la dirección que más se

adapte a la gestación de la forma asociativa basada en los requerimientos paramétricos, desarrollando sistemas morfológicos complejos a partir de un número indeterminado de variables geométricas. Tras esos parámetros, la tecnología comienza su tarea, el algoritmo o los algoritmos comienzan a trabajar con estas variables produciendo la múltiple simulación virtual de los objetos y es aquí en donde esta inmensa variedad de formas debe complementarse con las bases de la arquitectura: toda forma debe responder a una necesidad y en cuanto más fuerte y vital sea ésta, más lógico será el resultado, de este modo evitará caer en la práctica sin trascendencia de la forma por la forma, para incluir de esta manera al diseño arquitectónico en una disciplina incluyente de todas las variables

La transición de la técnica del dibujo a mano a las herramientas tecnológicas, ha sufrido de resistencia y desprestigios en su aplicación como apoyo para el diseño asistido por computadora, exhibiendo una discrepancia entre la arquitectura tradicional y la asistida por computadora que no debería existir, es nuestra obligación identificar la función de cada elemento: los programas (CAD) asentaron su función en la automatización de reglas introducidas al software, traduciendo estas órdenes en trazos de líneas (Kobayashi, 2012) pero en estos momentos necesitamos de herramientas que promuevan la creatividad arquitectónica y al mismo tiempo respondan a las complejidades espaciales y materiales actuales.

Los primeros experimentos cibernéticos para el adelanto de estos instrumentos, entendieron a la arquitectura como un sistema funcional autónomo que regula la propia independencia de las personas participantes y que mantiene su compromiso con la tradición racionalista, decretando al dibujante como el agente capaz de manejar las variables paramétricas para promover a la herramienta con facultades de interpretación y reinterpretación del proceso morfológico, comenzando una insólita relación de la herramienta y el diseñador que por primera vez se apoya en un sistema capaz de proponer y no sólo obedecer.

TRABAJO INTERDISCIPLINARIO

En la naturaleza, las estructuras establecidas son el resultado de procesos colectivos en los que participan muchos individuos realizando procesos de manera secuencial y culminan con la formación de un organismo complejo o el conjunto de ellos. De igual manera, la planeación que debemos tener en el diseño requiere de la participación de diversas áreas de investigación, la colaboración interdisciplinaria de matemáticos, químicos, físicos, biólogos, naturalistas y demás actores especialistas de diferentes disciplinas puede resultar en un análisis mucho más completo, haciendo posible entender la emergencia de estructuras morfológicamente funcionales.

Cuando comprendamos el diseño paramétrico estructural como un reto interdisciplinario, empezaremos a aprender los beneficios de la optimización evolutiva como un proceso integrador (*bottom-up*) en la estrategia de diseño, que va desde lo más básico de un elemento hasta los más grande de un conjunto (Stratil, 2009).

En biología se han recorrido muchos caminos, llegando al resultado de que la morfología de los organismos responde a etapas de adaptación y evolución, provenientes de procesos de autoorganización en los sistemas que pertenecen a efectos cooperativos no lineales, entre los elementos que los constituyen, y en la búsqueda de patrones, muchas formas biológicas parecen seguir reglas matemáticas o geométricas sencillas.

Como ejemplo, los diversos diseños de hojas vegetales que podemos encontrar en la naturaleza.

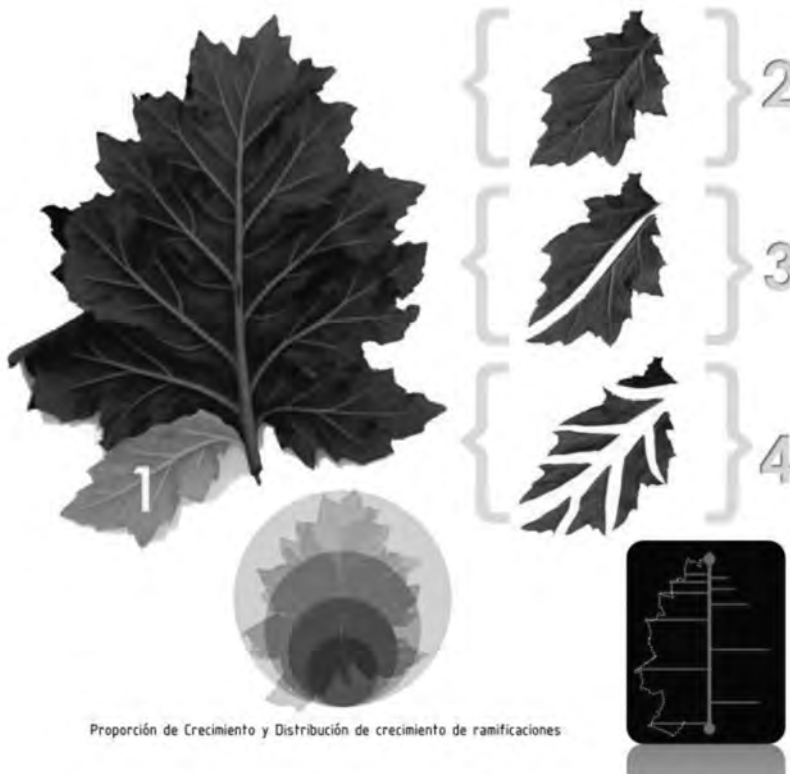


Imagen 2. Ejemplo de sistema cooperativo no lineal y jerárquico en la naturaleza. Fuente: Elaboración paramétrica propia.

Las matemáticas se hallan en la base de los parámetros que están detrás del origen de las estructuras naturales, son mecanismos subyacentes que derivan en la emergencia de patrones para explicar la

aparición de formas existentes en los más variados sistemas. Una vez que se precisan los rangos de los parámetros, se procede a resolver el sistema en modelos que simulen la parte física real en la que emergen los patrones.

Los estudios naturalistas son imprescindibles para aterrizar las especulaciones formales de modos más efectivos. Aprovechando los estudios sobre la ciencia biológica, los naturalistas se apoyan en la explicación de las funciones del organismo, explicando el porqué de cada elemento y su razón de existir o del por qué puede dejar de estar presente en la constitución física del objeto natural.

Sin diferenciar si se trata de elementos vivos o elementos inanimados la investigación de tipo biomimético requiere un enfoque interdisciplinario de especialistas de diferentes campos, aportando conocimientos científicos y metodológicos que respondan a una serie de estudios más avanzados en comparación con los análisis realizados por los diseñadores.

En un mundo donde la ciencia y la tecnología se están desarrollando cada vez más rápido, las nuevas tecnologías pueden facilitar la reinterpretación de la naturaleza y el desarrollo de sistemas artificiales. A través de la fusión del análisis de diseño arquitectónico con la investigación científica basada en el laboratorio, se puede acceder a nuevas disciplinas cimentadas en el estudio de muchas disciplinas.

Hasta este punto se entiende que el proceso creativo del arquitecto puede estar basado en suposiciones referenciales de los procesos morfológicos naturales, pero necesita de diferentes especialistas para aterrizar los procesos obtenidos mediante esta indagación, en todo caso, si realmente queremos instaurar plenamente un proceso generativo basado en la morfogénesis natural con este tipo de estudios, los arquitectos debemos apoyarnos en profesionales para adentrarnos de lleno en las ciencias involucradas en la investigación de la morfogénesis natural.

APLICACIONES EN EL DISEÑO

Muchas pueden ser las pautas que pueden marcarse como jerarquía de la metodología en el proceso de diseño, sin embargo, identificamos una condicionante que se presentan en todas las edificaciones naturales analizadas: Relaciones estructura-función, no pueden existir componentes que estén demás, todo funciona y el proceso evolutivo se encarga de estar en constate innovación de lo que puede mejorar o dejar de servir cuando las condiciones externas permuten.

La relación estructura-función, antes mencionada, no es un principio universal en la aplicación del tema, aclaremos que toda estipulación mencionada como precedente en los casos anteriores y siguientes, son modelos proyectados como norma de las condiciones funcionales en-

contradas y posteriormente desarrolladas en la aplicación del diseño arquitectónico y en el diseño en general.

Entonces podemos establecer que la estructuración jerárquica natural es una de las premisas paramétricas que establecen la armonía de los conjuntos naturales.

Bajo este antecedente determinamos que el crecimiento de la forma y su materialización en su totalidad se crean en el mismo proceso, implicando una secuencia de procesos de organización en una escala microestructural, pero de una manera escalonada, iniciando la estructuración jerárquica que permite la construcción de órganos grandes y complejos sobre la base de mucho más pequeños, bloques de construcción, a menudo muy similares.

El Sinosteel International Plaza¹ representa una descripción más objetiva de lo que se plantea en respecto al desarrollo de estructuras mayores a partir de la estructuración jerárquica.

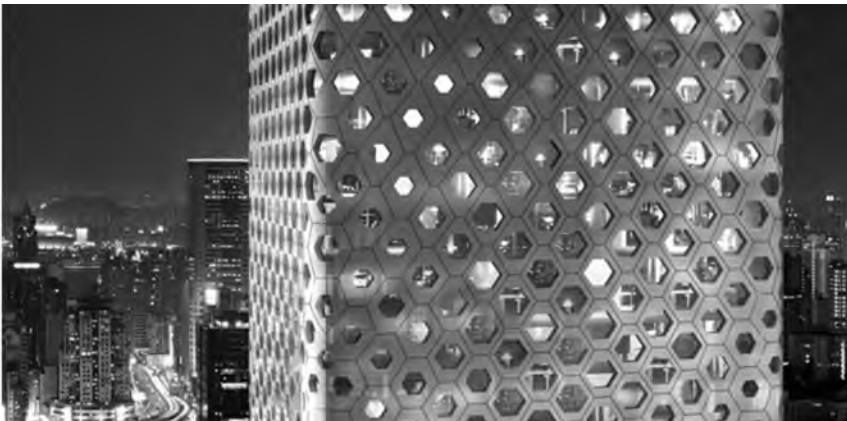


Imagen 3. Fachada del Sinosteel International Plaza. Fuente: <http://www.evolo.us/architecture/honeycomb-facade-for-soften-urban-landscape-sinosteel-tianjin-by-mad-architects>. Consultado: junio 2013.

La fachada es un esqueleto exterior que elimina la necesidad de las columnas, excepto en el núcleo del edificio, por medio de una combinación geométrica estructural diseñada con base en un modelo repetitivo, un patrón hexagonal que se multiplica y se repite, a través de la envolvente compuesta por cinco unidades estandarizadas en diferentes ventanas hexagonales, representado cambios de fachada con el paso de luz a través de las ventanas del edificio como un patrón

¹ Sinosteel International Plaza, Ubicado en Tianjin China y desarrollado por MAD Architects.

evolutivo, ya que responde a las necesidades de iluminación de cada espacio según las condiciones, necesidades y orientaciones.

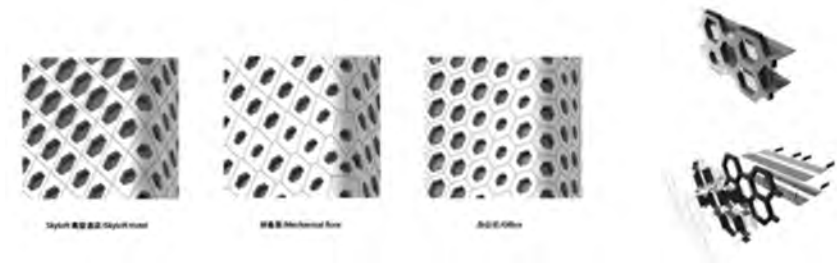


Imagen 4. Modulación en Fachada. Fuente: <http://www.evolo.us/architecture/honeycomb-facade-for-softer-urban-landscape-sinosteel-tianjin-by-mad-architects>. Consultado en junio 2013.

Otro ejemplo basado en similitudes conceptuales es el faro rompeolas KAUST², este mismo fue instaurado utilizando diseños moldeados como un panal para aprovechar su forma geométrica, utilizándola como cubierta autoportante, sin embargo este proyecto evolucionó en un diseño más complejo, que se extendió más allá de la forma y resolvió problemáticas de confort térmico.



Imagen 5. Fachada del Faro Rompeolas KAUST. Fuente: <http://www.evolo.us/architecture/contemporary-honeycomb-lighthouse-kaust-breakwater-beacon-for-king-abdullah-university>. Consultado en junio 2013.

2 El faro rompeolas KAUST, diseñado por Urban Art Projects para la Universidad Rey Abdullah de Ciencia y Tecnología ubicada en Arabia Saudita.

El rascacielos fue diseñado como una torre de enfriamiento con la ayuda de la brisa del mar y el efecto chimenea, extrayendo el aire caliente hacia arriba y hacia fuera mientras atrae aire frío desde el océano. Por la noche, la torre se ilumina desde dentro y brilla a través de los panales para actuar como un faro para los barcos y en el día la piel da un efecto de sombra moteada y, al igual que el caso del Sinosteel International Plaza, la piel se elaboró en forma de piezas modulares prefabricadas para que funcione como estructura autosoportante y no necesite de un esqueleto interno más que sólo la piel misma.

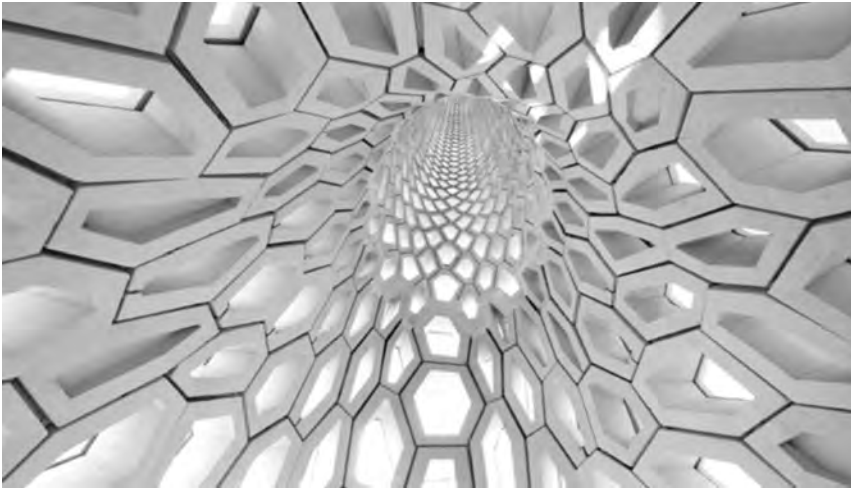


Imagen 6. Interior del Faro Rompeolas KAUST. Fuente: <http://www.evolo.us/architecture/contemporary-honeycomb-lighthouse-kaust-breakwater-beacon-for-king-abdullah-university>. Consultado en junio 2013.

Observamos que una de las ventajas de seguir este parámetro es la de evitar cargas en lugar de soportarlas, manifestándose en una piel estructurada autosoportante, no obstante, tenemos que analizar el estudio de sus mecanismos de soporte, señalar algunas características particulares y ofrecer algunas posibilidades de extrapolación práctica, no sólo de semejanza homóloga.

Debemos distinguir claramente, en el diseño paramétrico enfocado a la morfogénesis, dos polos visiblemente definidos. En uno tenemos a la arquitectura que utiliza la forma natural de manera literal, desde un punto de vista eminentemente estético, visual, donde se representan especies vegetales o animales en los elementos constructivos o en el conjunto edificatorio. En otro polo, en cambio, se encuentra la arquitectura que racionaliza las funciones de determinadas morfologías presentes en la naturaleza y que resuelven de manera interesante problemas similares a los que se enfrenta el diseño arquitectónico (Soffia, 2006).

CONCLUSIONES

Comprender y utilizar patrones del proceso de adaptación y optimización evolutivo en el desarrollo de procesos metodológicos arquitectónicos, sirve como impulso de “nuevas” formas de proyección arquitectónica sustentada por el proceso de diseño empírico de la naturaleza que podríamos enunciar con un funcionalismo natural y que integra a su vez un diseño estético.

El diseño biomimético debe trascender más allá del argumento artístico, debemos orientar nuestros análisis e investigaciones en el entendimiento del proceso responsable del origen en la constitución física de las morfologías naturales, para poder utilizar las condiciones y patrones que dictan los parámetros desencadenantes de la constitución física del objeto natural.

Debemos hacer hincapié en la utilización de las herramientas tecnológicas para optimizar nuestras funciones como diseñadores arquitectónicos. Es común ver que la adopción de nuevas herramientas genere un proceso de adaptación con cierta resistencia a los que nos cuesta adaptarnos a la tecnología, pero no debemos menospreciar el proceso creativo que se apoya en este tipo de instrumentos, escudándose con el argumento de la pérdida de lo “poético” en el proceso de diseño, la estética formal sigue ahí, no como reflejo de diseños de varios años atrás, más bien como el reflejo de una estética experimental actual.

FUENTES DE CONSULTA

BIBLIOHEMEROGRAFÍA

1. Abbott, A. y Ellison, M. (2008), *Biologically inspired textiles*, Woodhead Publishing, England.
2. Fratzl, Peter (2007), “Biomimetic materials research: what can we really learn from nature’s structural materials?” in *Journal of the Royal Society Interface*, Les Dutton, Reino Unido.
3. García Alvarado, Rodrigo, Lagos, Rodrigo, Salcedo, Pedro, Ramos, Mario, Labarca, Claudio y Bruscato, Underlea (2009), “Emociones precisas: fabricación, digital en la enseñanza de la arquitectura” en *Arquitetura Unisinos*, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil.
4. George, Anne (2011), *Advances in Biomimetics*, Prof. Marko Cavrak, India.
5. Gilbert, Scott F. (2003), *Developmental Biology*, Sinauer Associates, USA.
6. Knippers, Jan y Speck, Maria Thomas (2012), “Design and construction principles in nature and architecture” en *Bioinspiration & Biomimetics*, IOP Science, University of Stuttgart, Alemania.

7. Ogino, Paulo (2010), "Arquitectura Digital: Lo digital en el proceso de diseño y el espacio arquitectónico" en *Revista 180*, Núm. 18, Imagen y proceso, Universidad Diego Portales, Chile.
8. Sánchez, Faustino (2006), "Morfogénesis y emergencia de patrones en sistemas biológicos: Del rompimiento de simetría a la autoorganización y la excitabilidad" en *Las ciencias de la complejidad y la innovación médica. Ensayos y modelos, planeación y servicio*, CEIICH-UNAM/Instituto de Física, México.
9. Soffía, Alejandro (2006), "Biomímesis: Una oportunidad para el diseño sostenible. Relación entre la morfología animal y la producción de Energía" en *Revista 180*, Núm. 25, Energías posibles, Universidad Diego Portales, Chile.
10. Velasco, Rodrigo (2011), "Sobre el uso de herramientas digitales dentro de la formación profesional en Arquitectura" en *Alarife: Revista de arquitectura*, Núm. 21, Universidad Piloto de Colombia, Colombia.

MESOGRAFÍA

1. Gay, Aquiles, "La ciencia, la técnica y la tecnología", Facultad Regional Río Grande, [En línea] <http://www.frrg.utn.edu.ar/apuntes/cmasala/CienciaTecnicaTecnologia%20gay.pdf>, consultado el 16 de febrero de 2013.
2. Kobayashi, Pablo (2012), "Materia", [En línea] <http://www.materia.com.mx/>, consultado el 10 de abril de 2013.

ENCUENTRO ACADÉMICO

1. Stratil, Julia, *Evolutionary Formfinding in the information age*, Symposium of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), Universidad Politécnica de Valencia, España, 28 septiembre – 2 octubre 2009.