

Diseño paramétrico en estructuras

Forma estructural, eficiencia y reutilización de elementos



María del Carmen Fernández Saiz, Cecilia Nicasio

Palabras clave: sustentabilidad, diseño paramétrico, estructura, eficiencia.

Introducción

A partir de mediados del siglo XX ocurre la confluencia de una serie de fenómenos: la acumulación de experiencia en el traslado a la arquitectura de conceptos surgidos de la observación de la naturaleza, el desarrollo de la Teoría General de Sistemas como marco teórico interdisciplinario, la vigencia de la idea clásica de que la belleza en el arte se desprende de la mimesis de la naturaleza, valores propios de la cultura actual como la sostenibilidad y la eficiencia energética, el inicio de un desarrollo explosivo de la informática que facilita el manejo de grandes volúmenes de información. En este contexto, surgen las oficinas de diseño multidisciplinares en las que un conjunto de profesionales de diversas áreas del conocimiento trabajan en colaboración.

Esta confluencia posibilita el desarrollo sistemático de ideas arquitectónicas tales como métodos de form-finding, formas complejas ajustadas a las solicitaciones físicas, modelos de crecimiento fractal, diseño de dispositivos optimizados para cumplir múltiples funciones, organización espacial jerárquica y diseño algorítmico, que han orientado la búsqueda de la eficacia y la optimización de las estructuras en la arquitectura reciente.

En el siglo XXI es necesario abordar con rigor el diseño estructural a distintas escalas. La generación geométrica a través de sistemas computacionales y la morfología son disciplinas capaces de brindar la información necesaria para alcanzar un nuevo nivel de eficacia y de optimización en las construcciones. Debemos considerar las solicitaciones provocadas por las fuerzas fundamentales en la materia, establecer una íntima relación entre sus huecos y el uso del espacio, y abordar el diseño de dispositivos con múltiples funciones, a distintas escalas. Una agenda de trabajo como ésta implicaría la colaboración entre técnicos de diversas disciplinas, tales como matemáticas, física, química, informática, ingeniería y arquitectura.

Las nuevas estrategias proyectuales destacan el rol fundamental de las estructuras en el

desarrollo de un planteo arquitectónico-tecnológico sustentable, como respuesta a nuevos paradigmas en cuanto a materiales, y posibilidades de conformación de los tipos estructurales, partiendo de la geometría como elemento generador de la forma arquitectónica-estructural mediante la utilización de recursos y herramientas computacionales, que permiten primero generar y luego analizar el comportamiento de las estructuras en el espacio.

Los métodos form-finding comenzaron a utilizarse como instrumentos de diseño arquitectónico a finales del siglo XIX, basados en procedimientos empíricos que utilizaban la “homeostasis” que algunos sistemas materiales desarrollan bajo la influencia de ciertas fuerzas externas. Reproducían mecanismos naturales de auto organización intentando descubrir formas eficaces para una determinada función. El arquitecto Antoni Gaudí fue el primero en diseñar sus construcciones basado en este tipo de experimentos, desarrollando procedimientos que le permitían encontrar formas óptimas para resistir las fuerzas gravitatorias.

En los puentes diseñados por Robert Maillart a principios del siglo XX, aparece por primera vez el concepto de formas complejas adaptadas a las sollicitaciones físicas. Las características del hormigón armado indujeron a Maillart a imaginar y diseñar estructuras cuyos componentes pueden considerarse como un todo continuo, cuyas formas se acercan o coinciden con la línea de presiones del sistema de cargas actuantes, y cuyas secciones se deducen de las sollicitaciones físicas. En la medida en que el comportamiento de la materia es quien fundamentalmente determina la forma de la estructura y la geometría de sus secciones, podría considerarse que la metodología de diseño empleada por Maillart, si bien es analítica, recurre al concepto de auto organización de la materia para reducir la cantidad de material estructural.

Diseño Algorítmico

En la materia orgánica existen procesos codificados que determinan la emergencia de formas, mediante la interacción con el medioambiente y con las fuerzas físicas. Estos procesos de auto organización son no lineales, por lo que rara vez es posible observar en la naturaleza dos formas completamente idénticas. Cecil Balmond, uno de los pioneros del Diseño Paramétrico, se ha planteado recientemente la posibilidad de diseñar estructuras utilizando procedimientos algorítmicos que emulan la complejidad de estos procesos naturales. Partiendo de patrones eficaces para una determinada función y definiendo un recorrido, pretende diseñar formas complejas y optimizadas. Esto implica el desarrollo de una estrategia geométrica para generar una forma compleja, y una vez definida ésta, es posible determinar sus deformaciones y sollicitaciones para ajustar los bordes o los puntos y definir otra más eficiente, con el mismo patrón. Al igual que en la naturaleza, una forma es sólo una de las tantas representaciones posibles de un determinado patrón; existen, por lo tanto, infinitas soluciones posibles.

En la actualidad existen numerosos grupos que están en la misma línea, como por ejemplo:

- Institute of Building Structures and Structural Design (University of Stuttgart)*, con studios orientados hacia la ciencia de los materiales para la producción de soluciones de alto rendimiento y su aplicación, y el estudio de morfologías estructurales innovadoras.

-*Form Finding Lab Princeton Stuart Weitzman School of Design (University of Pennsylvania)*, Laboratorio de estructuras poliédricas (PSL), es un laboratorio de investigación interdisciplinario que conecta arquitectura, ingeniería estructural, informática, matemáticas y ciencias de los materiales para enriquecer la geometría arquitectónica y conciliar la función, la forma y la tecnología, ampliando los límites de los métodos de construcción convencionales y desarrollando nuevas técnicas de fabricación para geometrías y sistemas estructurales desafiantes.

-*Grupo de Investigación de Bloques (BRG) del Instituto de Tecnología en Arquitectura (ETH Zürich)*, dedicado a desarrollar nuevos algoritmos, herramientas eficientes y accesibles para un diseño estructuralmente informado, en respuesta a demandas reales de los problemas complejos de diseño estructural para formas expresivas y altamente eficientes. Se trabaja con cascaras de concreto delgadas, estructuras de membrana "activas en flexión", sistemas de encofrado de tela y sistemas espaciales generales de fuerzas con aplicaciones en diseño de puentes y grandes abarcan techos. Este grupo ha generado herramientas y plataformas como Equilibrium , RhinoVault.

-*Dr. Arq. Alberto Pugnale*, Profesor Titular de Diseño Arquitectónico en la Facultad de Arquitectura, Construcción y Planificación (Universidad de Melbourne), coordinador académico de la *Hallmark Research Initiative (HRI)* en Bioinspiración. Su equipo desarrolla y aplica técnicas de optimización numérica, como los algoritmos genéticos desarrollados en Rhinoscript, que permiten explorar las variaciones de forma durante el diseño conceptual en tiempo real, transformando el procedimiento de optimización convencional de "mejora de forma" en un proceso computacional de morfogénesis.

Desde el área de las estructuras, la sustentabilidad se define según la cantidad de material utilizado para construir una estructura eficiente, con la forma adecuada para resistir esfuerzos. En este contexto, el plug-in Kangaroo permite conseguir resultados eficientes según la variable que queramos optimizar. Con Kangaroo podemos configurar todas las variables que involucran el proceso de form-finding, personalizándolo y aplicándolo a casos específicos. Este software no analiza esfuerzos en los miembros, sólo deforma la geometría en función de variaciones en el módulo de rigidez del material, la intensidad y dirección de cargas aplicadas, la definición de puntos límites de desplazamiento, las deformaciones límites, las restricciones de longitud y deformación de las barras componentes, etc. Es posible, en consecuencia, la generación digital de geometrías basadas en elementos morfológicamente simples como barras cortas, pero relacionados de manera compleja, lo que permitirá el uso de materiales en su estado natural (madera o bambú), o que por sus dimensiones no se puedan aprovechar en otros usos (barras de madera cortas que surjan de descarte, etc.). Se pretende, así, indagar en las posibilidades de incorporar estas lógicas paramétricas a las prácticas arquitectónicas locales, como alternativa proyectual, fundamentalmente en lo referente a la simplificación en los diferentes procesos de fabricación.

Una vez encontrada la forma, se genera una nueva estructura con esta nueva geometría, que se exporta a programas de cálculo tipo ram-system para su evaluación y verificación.

El uso de estas herramientas posibilita también visualizar espacialmente la forma generada y realizar los ajustes necesarios con celeridad, lo que implica una ventaja de los modelos virtuales frente a maquetas reales. El interés del proyecto reside entonces, no

sólo en la forma resultante, sino también en el proceso que la genera.

Desarrollo

En esta línea se presentan trabajos cuyo proceso de diseño surge a partir de las primeras ideas de Gaudí sobre el funicular de las cargas, transferidas a métodos y modelos actuales. El objetivo de estos trabajos fue ensayar una nueva estrategia de diseño a partir de la utilización de un plug-in del software Grasshopper, que posibilita la incorporación de fenómenos físicos a la geometría para la optimización estructural.

Mediante la generación de una forma a partir de leyes físicas (la geometría como expresión de la acción de las cargas), se diseña sobre la base del comportamiento físico de estructuras.

A partir de la deformación simulada de una lámina plana, mediante la utilización de un software específico como herramienta de diseño estructural, es posible la obtención de formas complejas, en sucesivos ajustes de la geometría hasta obtener aquella estructura que resulte más eficiente en su comportamiento, desde el punto de vista de deformaciones y tensiones límite. Este método permite examinar rápidamente muchas variaciones del mismo sistema, con el fin de generar una rápida retroalimentación dentro del proceso de diseño, convirtiéndolo en un proceso evolutivo integrador.

En el trabajo se presentan los ejemplos realizados durante la etapa de estudio del programa. Son ejemplos de diverso origen y concepción, que tienen en común el carácter exploratorio en lo referido a la generación de la forma estructural, utilizando las geometrías complejas.

Kangaroo es un motor de física, que se acopla al programa Rhinoceros, como plug-in de Grasshopper. Permite generar una malla partiendo de superficies planas de diferentes formas, definiendo parámetros variables vinculados a Grasshopper, como se muestra en la Figura 1.

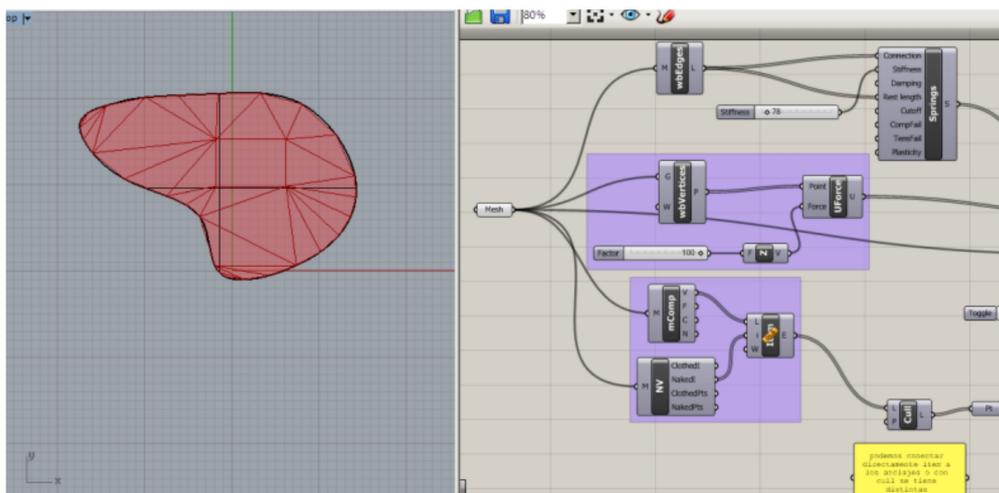


Figura 1. Transformación en malla de la superficie. Fuente elaboración propia.

Por medio del plug-in Wb, se logra identificar y extraer líneas y nudos de las mallas anteriormente generadas. Estas líneas (barras de la estructura) serán conectadas con un primer bloque que se ocupa de dar las características mecánicas a la malla, luego la matriz “springs”, la que da a esas líneas propiedades de rigidez, criterio de longitud después de

la deformación aplicada, amortiguamiento, etc.

Luego se conecta la misma malla a un segundo bloque que extrae nudos, permitiendo la aplicación de cargas o fuerzas verticales en cada uno (de cualquier tipo).

Un tercer bloque identifica los nudos, permitiendo definir cuáles serán apoyos, estarán anclados, identificando los vértices que limitan mallas, como se muestra en la Figura 2.

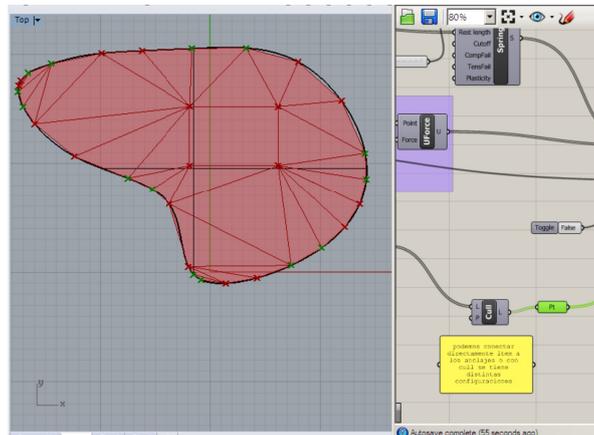


Figura 2 .Elección de vértices. Fuente elaboración propia.

Por último, se conectan los dos primeros bloques: “springs” y “fuerzas” al ítem donde se asigna magnitud a las fuerzas, y a los apoyos o anclajes. Luego, se activa la simulación y como salida se coloca una malla, que será deformada por acción de cargas. En este caso se ha asignado una carga de 100 N en dirección del eje z (vertical), y además se ha activado un intervalo de tiempo para el proceso de deformación, y se ha configurado en cero la rigidez de los elementos. Se obtiene una nueva geometría relajada y deformada con la carga aplicada. En la Figura 3 se puede apreciar la malla original plana y la nueva geometría deformada, conservando las longitudes iniciales de las barras de la malla.

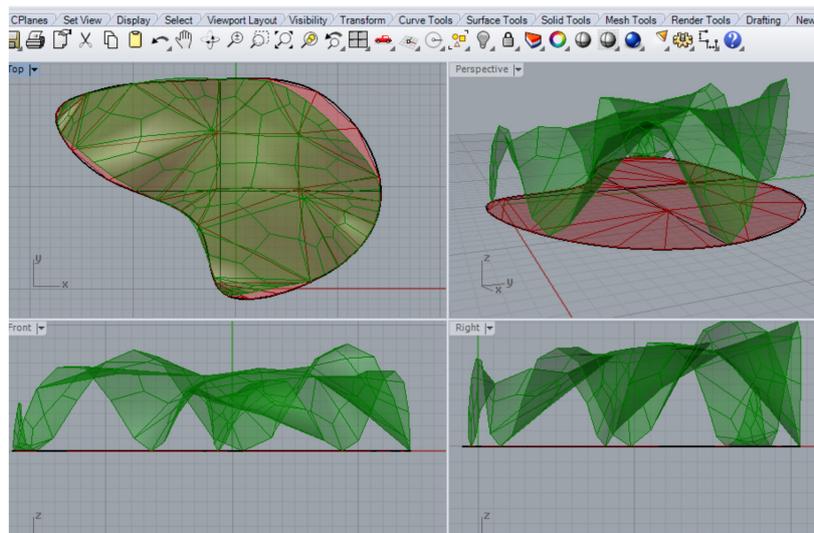


Figura 3. Deformación con puntos de anclajes. Fuente elaboración propia.

En la Figura 4 se muestra otra alternativa geométrica de estudio, generada a partir del aumento de rigidez de las barras que conforman la estructura de sostén, pero

permitiendo la variación sus longitudes.

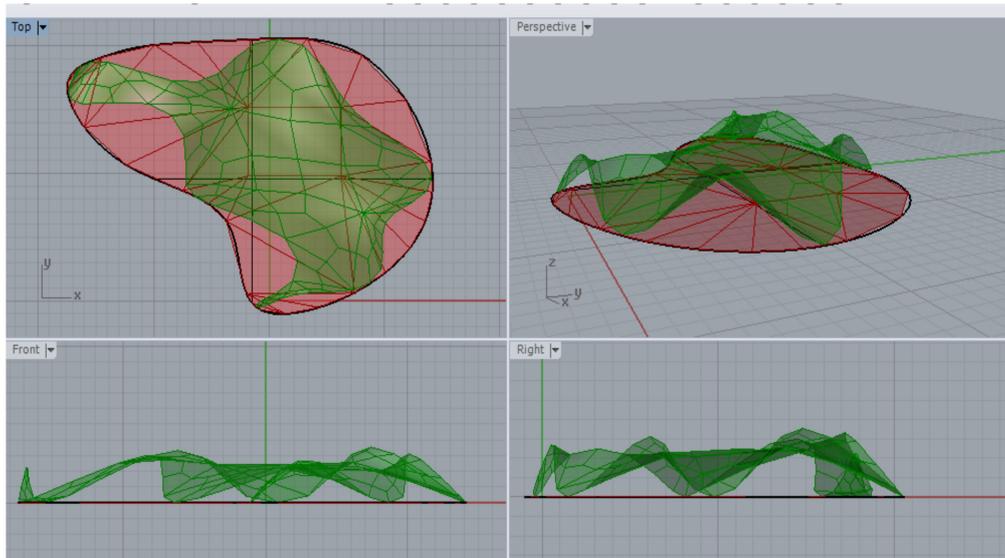


Figura 4. Malla original y deformada. Fuente elaboración propia.

Pueden obtenerse un gran número de configuraciones diferentes, con solo variar alguno de los parámetros definidos.

En la Figura 5, se han fijado los largos de barras y se ha aumentado la rigidez de las mismas. Como resultado se obtiene una nueva geometría.

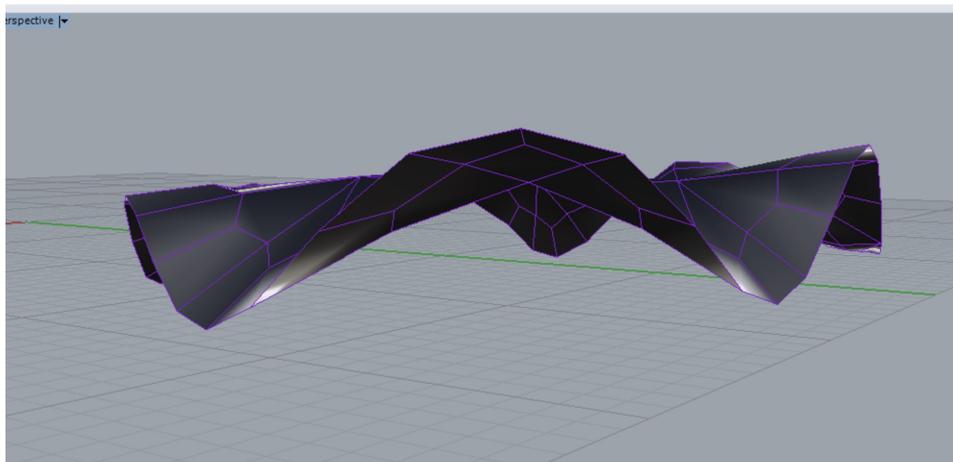


Figura 5. Geometría terminada. Fuente elaboración propia.

En las figuras 6 y 7 se muestran diferentes configuraciones geométricas obtenidas a partir de diferentes geometrías de referencia, o diferente disposición de los puntos de apoyo.

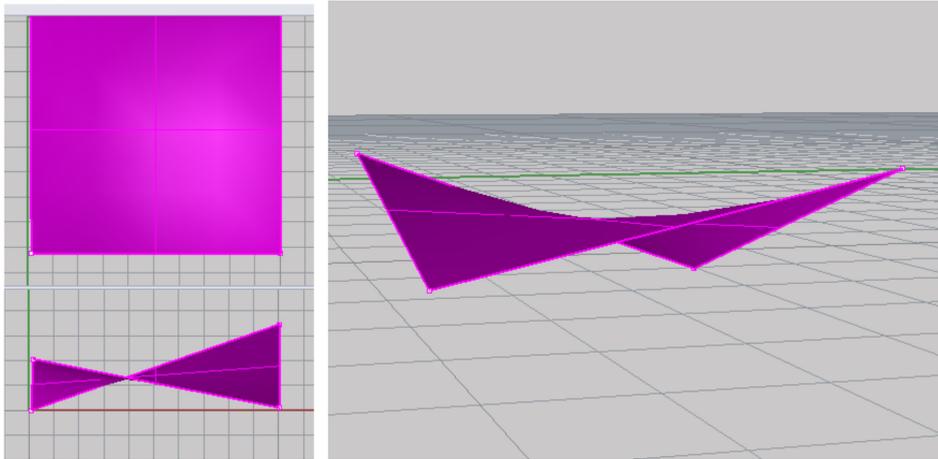


Figura 8. Superficie deformada. Fuente elaboración propia.

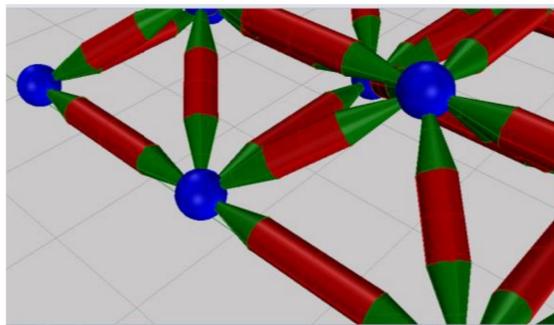


Figura 9. Resolución de nudos adaptativos. Fuente elaboración propia.

Se ha desarrollado también un algoritmo que resuelve el nudo adaptativo a través de un cilindro hueco, al cual se le sueldan planchuelas que unen barras de madera de sección rectangular. En la Figura 10 se muestra el desarrollo del algoritmo que permite adaptar el nudo a cualquier configuración geométrica.

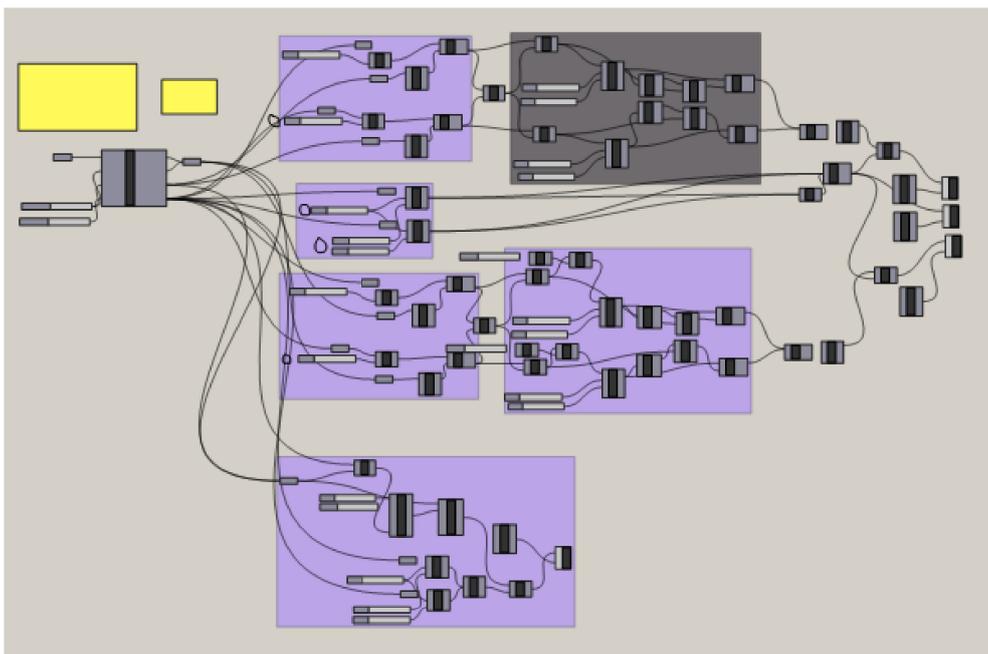


Figura 10. Algoritmo generativo. Fuente elaboración propia

En la Figura 11 se muestra este segundo tipo de nudo adaptativo, en el que se puede adaptar automáticamente el ángulo de incidencia de las planchuelas en función de la orientación e inclinación de las barras estructurales.

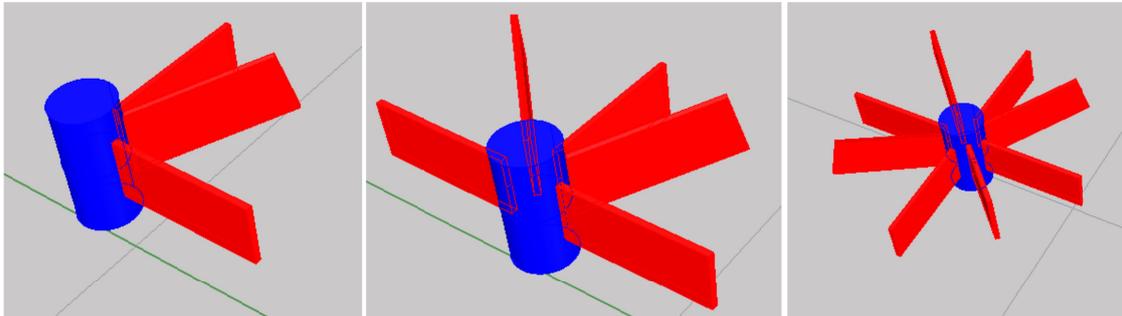


Figura 11. Distintos nudos adaptativos. Fuente elaboración propia

Conclusiones

El objetivo de este trabajo es posibilitar el desarrollo sistemático de ideas arquitectónicas con la aplicación del método form-finding, que permite la generación de formas complejas ajustadas a las solicitaciones físicas, y el diseño de dispositivos optimizados por medio de un software de generación geométrica.

Por medio del diseño de algoritmos, se pueden verificar las posibilidades en las configuraciones o transformaciones que puede tener una superficie plana frente procesos de deformación y generación geométrica, a través de un software específico como Kangaroo.

El algoritmo generado permite múltiples alternativas geométricas que responden al criterio de eficiencia estructural, en función de la variación de cargas aplicadas (magnitud, dirección, tipo), y que simultáneamente muestran un proceso evolutivo del mismo.

Las formas resultantes de estos procesos pueden ser aplicadas en obras de arquitectura o ingeniería obteniendo generaciones geométricas por un camino diferente.

Estas geometrías optimizadas por forma, generadas por herramientas computacionales, son de difícil definición por métodos tradicionales, lo que dificulta también su construcción.

El objetivo del presente trabajo es el de exponer estrategias de diseño no tradicionales para las formas libres, considerando la búsqueda de la eficiencia estructural.

Estos procesos de diseño, mediante el uso de software de diseño paramétrico, permiten generar una geometría que es el ingreso gráfico a cualquier software de análisis estructural, como método de verificación del mismo, permitiendo una simulación en tiempo real, de modo de generar ajustes, optimizando la estructura.

También es posible solucionar, a través del desarrollo de un algoritmo, las uniones entre elementos, que serán variables, de modo de definir un nudo tipo adaptable al esquema estructura variable.

Bibliografía

- ARIZA RUIZ, J. O. (2009). *Estructuras Recíprocas: bases para su aplicación arquitectónica*. Bogotá, Colombia. Ed. Universidad Nacional de Colombia.
- BAIXAS, J.I. (2010). *Forma resistente*. Ediciones ARQ. Santiago de Chile
- BERGE, B. (2009), *The Ecology of Building Materials*, Elsevier, Architectural Press, Oxford.
- DUNN, N. (2012). *Proyecto y Construcción Digital en Arquitectura*. Ed. Blume. Barcelona, España.
- FERRE, A. - KUBO, M. - PRAT, R. Y OTROS (2004). *Verb Matters*. Editorial Actar, Barcelona.
- FONTANA CABEZAS, J. (2014). *El diseño estructural en las formas complejas de la arquitectura reciente*. Instituto de la Construcción, F. A. U de la R, Montevideo, Uruguay.
- HWANG, I. - FERRE, A. - SAKAMOTO, T. Y OTROS (2006). *Verb Natures*. Editorial Actar, Barcelona.
- JARAMILLO SUAREZ, D - SANCLEMENTE MANRIQUE, A (2003), *Estudio de Uniones en Guadua con ángulo de Inclinación entre elementos* Univ. Nac. de Colombia, Facultad de Ingeniería, Depto. de Ingeniería Civil Bogotá.
- KRAUEL, J. (2010). *Arquitectura Digital - Innovación y Diseño*. Editorial Links, Barcelona.
- SAKAMOTO, T. (2008). *From Control to Design. Parametric/Algorithmic Architecture*. Ed. Actar.
- SALAZAR, J. - PRAT, R. Y OTROS. (2001). *Verb Processing*. Editorial Actar, Barcelona.
- SÁNCHEZ CABALLERO, S. (2012) *Optimización estructural y topológica de estructuras morfológicamente no definidas mediante algoritmos genéticos*. Ed. U. Politécnica de Valencia
- TERZIDIS, K. (2006), *Algorithmic Architecture*. Oxford, UK, Architectural Press Elsevier.