

# De la Optimización Estructural Evolutiva al Diseño Paramétrico basado en desempeño; experiencias en plataformas integradas para estrategias de diseño multidisciplinarias

*From Evolutionary Structural Optimization to performance driven Parametric Design; experiences on integrated platforms for multidisciplinary design strategies*

**Rodrigo García Alvarado**

Universidad del Bío Bío, Chile

rgarcia@ubiobio.cl

**Arturo Lyon Gottlieb**

Pontificia Universidad Católica de Chile

alyon@uc.cl

**Abstract:** *This paper presents a research developed by a multidisciplinary team looking into the use of Topological Optimization and its integration to collaborative design platforms in early stages of design processes. The interest of the experience is focused on how Evolutionary Structural Optimization (ESO) models can be further integrated into parametric design software for the definition of adaptable components in response to environmental and architectural criteria. This research explores platforms and processes for the collaboration between software development, structural engineers and architects in early stages of design as a possibility to relate the potential of computational processes with the definition of design criteria involving architectural, structural and environmental parameters.*

**Palabras clave:** Evolutionary Structural Optimization; Topological Analysis; Parametric Design; Performance Driven Design

Este artículo presenta la investigación desarrollada por un equipo multidisciplinar enfocado en el uso de Optimización Topológica y su integración a plataformas colaborativas en etapas tempranas del proceso de diseño arquitectónico. El interés de esta experiencia está en como los modelos de Optimización Estructural Evolutiva (ESO) pueden ser integrados en Diseño Paramétrico para la definición de componentes adaptables en respuesta a criterios de desempeño ambiental, constructivo y arquitectónico.

Comúnmente, la relación entre desarrolladores de software, arquitectos e ingenieros es lineal; el primero provee herramientas para facilitar el diseño; el segundo define un diseño específico; el tercero evalúa su comportamiento estructural. Esta investigación explora plataformas y procesos para la colaboración entre estas tres disciplinas en etapas tempranas del diseño como una posibilidad de relacionar el potencial de procesos computacionales con la definición de criterios de diseño a través de parámetros arquitectónicos, estructurales y ambientales.

Estudios recientes sobre Optimización Estructural Evolutiva han alcanzado importantes avances en la definición de soluciones estructurales óptimas a través del uso de modelos capaces de definir formas generales de edificios y la generación de componentes para edificios optimizados topológicamente (Huang-Xie 2010 y Aydin-Ayvaz 2008).

## Métodos ESO Aplicados a Diseño Arquitectónico-Estructural

El Análisis Topológico es un método de análisis estructural que actúa de forma inversa a los procesos tradicionales de cálculo estructural. En vez de verificar el comportamiento de una forma particular determinada previamente por el diseñador, de acuerdo a esfuerzos y propiedades materiales dentro de rangos de deformación aceptables, el Análisis Topológico busca generar la geometría óptima a partir de las condiciones definidas, por

medio de operaciones sustracción, agregación o redistribución de densidades de material. Estos procesos son hechos por cálculos computacionales recursivos sobre un espacio de trabajo subdividido en una grilla de elementos finitos. El Análisis Topológico busca la máxima rigidez con el mínimo uso de material. Generalmente el resultado de estos análisis son figuras complejas, con diversas bifurcaciones y ramificaciones para producir resistencia interna en las áreas en que es más requerida. Diferentes condiciones iniciales, metodologías e implementaciones computacionales han sido probadas. Si bien los resultados de estos procesos de diseño deben ser verificados con métodos tradicionales, sugieren innovadoras geometrías para estructuras complejas basadas en el desempeño estructural.

Las formas producidas como resultado del Análisis Topológico deben ser integradas con otros requerimientos y criterios propios del diseño. Con el objetivo de explorar estas posibilidades de integración en etapas tempranas del proceso de diseño, hemos desarrollado casos de estudio en distintas escalas y usos que van desde el mobiliario hasta una torre de oficinas altura media para ser construido en un Santiago de Chile. A través de dos workshops con estudiantes y el desarrollo de tesis de título en arquitectura y en ingeniería hemos investigado diversos procesos y estrategias de diseño para producir integración de criterios multidisciplinares necesarios para la implementación en cada caso.

El estudio comenzó con la modelación de la torre en una plataforma BIM para proveer una descripción completa de los elementos constructivos, así como para transferir información a software de simulación ambiental, llevando a cabo estudios de iluminación natural y de uso de energía. Los requerimientos estructurales fueron desarrollados en los software MATLAB, CALFEM y ANSYS utilizando procesos de Análisis Topológico. Algunos de ellos actuaron a nivel global, modificando el volumen general y otros actuaron a nivel local, definiendo cambios en algunos elementos estructurales. Diferentes algoritmos para optimización topológica fueron revisados y modificados para ser aplicados en este caso, explorando nuevas estrategias como *Solid Isotropic Material with Penalization* (SIMP) y *Bidirectional Evolutionary Structural Optimization* (BESO).

Los resultados de ejercicios de Optimización Topológica para el diseño para una torre de altura media fueron transferidos a software de diseño paramétrico a través de matrices numéricas, editando la información para extraer perfiles de formas así como la definición de volúmenes. Los diversos resultados de los ejercicios fueron evaluados en sus cualidades ambientales y espaciales a través del análisis de datos y de vistas renderizadas. El último paso de este estudio fue transferir algunos de los resultados de edificios y de componentes locales a modelos de impresión 3D. Estos modelos permitieron integrar información y revisar las formas y espacios generados, permitiendo comparar entre diferentes alternativas.

## Torre de Media Altura: Implementación de Variables de Desempeño en Plataformas Paramétricas

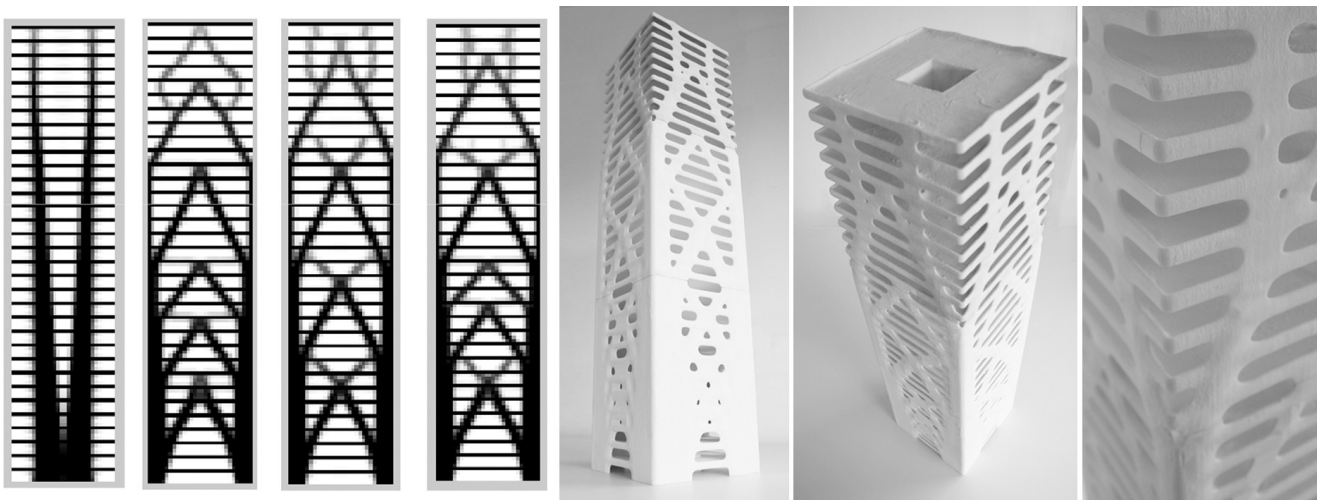


Fig. 1

También fueron usados para evaluar partes de componentes de fachada en aspectos de iluminación natural y de apertura visual. Esta serie de trabajos ha establecido diversas estrategias y modelos que abren nuevas posibilidades de integración entre desempeños estructurales y ambientales en el proceso de diseño de torres de media altura.

## Prototipo Arborea: integración de variables de Uso, Fabricación y Materialidad

El diseño y fabricación de un prototipo para un espacio de trabajo encargado a LyonBosch Arquitectos a través del Concurso Habitáculos de Conexión organizado por Arauco para el lanzamiento de nuevo tableros de madera aglomerada, fue utilizado para investigar la Optimización Topológica y sus posibilidades de materialización como base para el diseño de una pieza de mobiliario.

La propuesta se basó en la definición de tres usos propios del espacio de trabajo contemporáneo; una estantería para libros de artículos de distintos pesos y tamaños; un escritorio de trabajo y una reposera. Estos distintos usos fueron articulados dentro de una misma estructura compuesta por seis cuartos tableros verticales en sentido longitudinal, dos verticales en sentido transversales y piezas horizontales para soportar los distintos usos. Cada uno de las seis piezas verticales fueron analizadas topológicamente, considerando a sus condiciones de carga y restricciones constructivas y de usos definidas en el diseño original, utilizando plataformas similares a las usadas en el ejercicio de torres de media altura. Los resultados de la Optimización Topológica fue traducida a una plataforma paramétrica en la cual se definieron perfiles que luego fueron cortados a través de fresado CNC, obteniendo cada uno de las piezas estructurales del prototipo. La reposera presentaba una complejidad adicional ya que requería definir una superficie de apoyo ergonómica y los tableros utilizados no pueden ser curvados. Como solución se definió una relación paramétrica entre el grado de curvatura del perfil de la reposera y la subdivisión de su superficie en tramos independientes que varían su orientación para seguir la curvatura, produciendo una superficie ergonómica solo con piezas planas.

Este caso permitió establecer una relación entre los procesos de Optimización Topológica y condiciones constructivas y funcionales que fueron articuladas desde el inicio del proceso de diseño, resultando en la fabricación de un prototipo a escala real. La restricción de trabajar con tableros planos que no permiten ser curvados y el

uso de Optimización Topológica en 2D, permitió establecer una continuidad y concordancia entre algoritmos evolutivos de para la generación de geometría y las propiedades de materiales y los procesos de fabricación a fueron sometidos los componentes posteriormente.

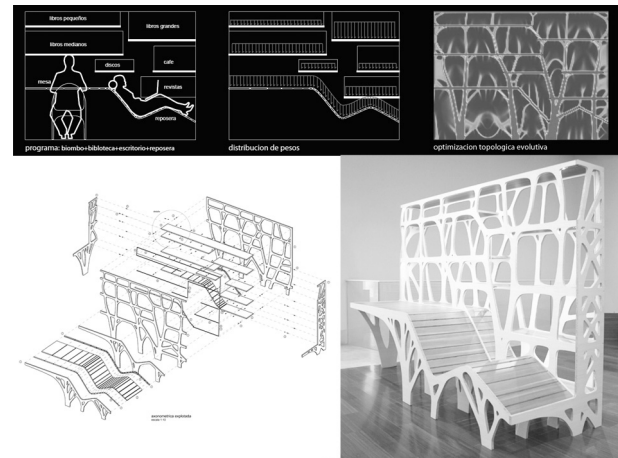


Fig. 2

## Desarrollo Integrado

Con el fin de experimentar e ilustrar la integración de optimización topológica estructural y ambiental en la gestación de la forma arquitectónica, estamos elaborando una programación paramétrica de espacios básicos. Para plantear un proceso generativo de diseño que disponga de condiciones técnicas involucradas (como una "racionalidad integrada", Attar et al, 2010). En una estrategia de etapas recursivas, operadas por un algoritmo genético para la selección de configuraciones más adecuadas, implementada en Grasshopper sobre Rhinoceros, con análisis de MatLab y Ecotect.

El proceso comienza con la generación automática de volúmenes adyacentes y/o sobrepuestos de dimensiones, rotación y disposición aleatoria a partir de una cantidad de superficie total. Elaborando distintas alternativas formales de recintos para un área cubierta equivalente a una edificación de pequeña o mediana magnitud. En la siguiente fase se asigna distintas condiciones de apertura a cada una de las caras de los volúmenes generados, considerando su localización dentro de la configuración. Las caras perimetrales verticales pueden tener distintas magnitudes de apertura central (como ventanas para la visión externa) o traspaso, así como las caras horizontales (entrepisos y cubiertas), reconociendo de este modo cierta organización funcional.

Paralelamente se ha elaborado un archivo gráfico de

configuraciones estructurales optimizadas para muros y losas independientes de una edificación pequeña o media en hormigón armado, a través del método SIMP, considerando cargas de peso propio, sobrecargas, carga muerta y esfuerzos sísmicos en distintas direcciones. En muros y losas de distinta magnitud y condiciones de apertura o traspaso (partes libres de visión o circulación). Generando una variedad de figuras finales (en archivos de imagen), según la evolución topológica optima con un 25% de material ocupado, identificando de este modo la disposición estructural resistente mas adecuada para las distintas configuraciones de elemento. Los perfiles son aplicados en cada una de las caras del volumen, según las dimensiones paramétricas y sus condiciones de apertura. Realizando posteriormente un vectorizado de cada perfil, con variaciones laterales para generar espesor de las piezas. De este modo se dispone de una configuración estructural optimizada para cada volumetría que cumple las condiciones de superficie requeridas. En cada configuración se realiza también una sumatoria de capacidades resistentes de cada elemento dispuesto y cálculo del centro de masa en relación al centro geométrico, para generar un índice de capacidad estructural global.

En la siguiente etapa se realiza un análisis de radiación solar de la configuración general según localización y orientación definida. Considerando mayormente edificaciones para zonas templadas en que se valora la cantidad global de radiación solar, como una contribución de calefacción pasiva y reducción de los consumos energéticos permanentes de la edificación.

El algoritmo genético pondera las valorizaciones de radiación y capacidad resistente, según la superficie generada, para cada una de las alternativas formales generadas. Probando aleatoriamente según poblaciones y cruces establecidas, para determinar una evolución adecuada para la superficie global solicitada.

Posteriormente se dispone de una etapa de programación paramétrica para la disposición constructiva de los elementos, definiendo distintos componentes de moldeaje y conectores para su ejecución. Analizando la utilización de placas y volúmenes de material.

Este desarrollo integrado se esta experimentado con modelos digitales y materiales a escala para la verificación visual y espacial de las alternativas generadas. Así como una ejecución a escala real para revisar la configuración constructiva y condiciones espaciales.

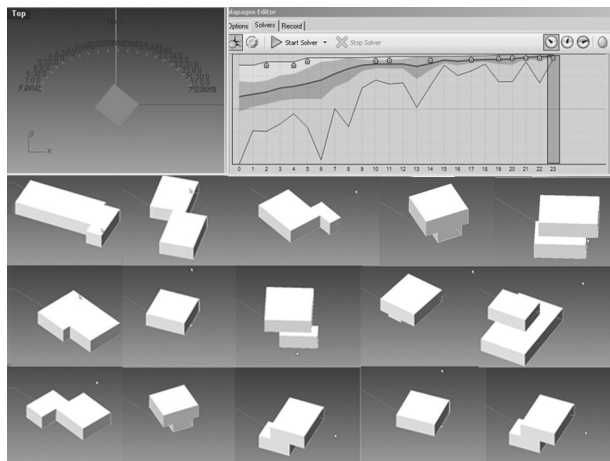


Fig. 3

## Conclusiones

Las experiencias realizadas en edificios en altura y mobiliarios incorporando optimización estructural evolutiva en plataformas paramétricas, y el desarrollo integrado demuestran la capacidad de generar configuraciones arquitectónicas innovadoras con un adecuado desempeño resistente y ambiental, además de cumplir condiciones funcionales requeridas. Lo que revela un camino de exploración formal novedoso, que asegura capacidades materiales y sostenibles de la edificación. Comprobando la posibilidad de vincular aspectos técnicos en el desarrollo inicial de la formulación arquitectónica.

Aunque se deben precisar las condiciones involucradas, expresadas numéricamente en rangos determinados, lo que establece campos de exploración limitados, en particular con algoritmos genéticos según las poblaciones y cruzamientos determinados (De la Barrera, 2010), pero de resultados variables y sugerentes. Por otro lado la implementación computacional requiere una formalización que exige capacidades, recursos y procesos determinados. Así mismo es muy relevante considerar que estos mecanismos de exploración poseen estrategias distanciadas de los procesos y disposiciones tradicionales del diseño arquitectónico, en que se resuelve la forma inicial a partir de una síntesis y formulación autónoma del diseñador. Entonces la formalización y variedad de alternativas generadas requiere una actitud innovadora y un proceso flexible de desarrollo, en un contexto cultural o de encargo particularmente abierto y motivado en ese sentido. Finalmente, se debe atender la particular cualidad espacial elaborada en las distintas soluciones de diseño, a través de la optimización estructural y ambiental, ya sea

en los ejemplos de torres, mobiliarios y espacios básicos, se orientan a formas orgánicas y variables. De modo que la búsqueda de eficacia material, hace emerger peculiarmente una variedad morfológica natural que cuestiona las disposiciones regulares y homogéneas de la abstracción proyectual. En ese sentido surge una tectónica de diseño arquitectónico, más allá de cualidades superficiales, orientada a formas complejas que otorgan una nueva sensibilidad espacial sustentable.

## Agradecimientos

FONDECYT 1100374 y a José Miguel Armijo, tesista de magister en arquitectura MARQ PUC.

## Referencias

- Almusharaf, Ayman M.; Mahjoub Elnimeiri (2010) "A Performance-Based Design Approach for Early Tall Building Form Development" ASCAAD 2010, Fez (Morocco), 19-21 October 2010, pp. 39-50
- Attar, Ramtin; Robert Aish, Jos Stam, et al. (2010) Embedded Rationality: A Unified Simulation Framework for Interactive Form Finding, International Journal of Architectural Computing vol. 8 - no. 4, p. 39
- Cárdenas, F. (2011) Implementación Optimización topológica de modelos continuos en tensión plana considerando fuerzas de gravedad. Memoria de Título Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Concepción. Concepción
- De la Barrera, Carlos (2010); "Algoritmos Genéticos como Estrategia de Diseño en Arquitectura", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, 206 p.
- Huang, X. y Xie, H. M. (2010) Evolutionary topology optimization of continuum structures. Wiley. Chichester
- Paris, L. (2007) Restricciones en Tensión y Minimización del Peso: Una Metodología General para la Optimización Topológica de Estructuras. Tesis Doctoral.
- Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Coruña. España.