

01

Diseño paramétrico en Arquitectura; método, técnicas y aplicaciones.



Nuevas tecnologías de diseño paramétrico en Arquitectura se han comenzado a utilizar especialmente en exhibiciones temporales o grandes proyectos complejos, pero sin esclarecer sus estrategias generales de trabajo. Este artículo plantea metodologías para aplicar diseño paramétrico en la integración de aspectos técnicos en el proyecto arquitectónico con el fin de mejorar sus prestaciones. Se plantean estas capacidades como un campo de operaciones proyectuales, con una taxonomía de parámetros y diversas técnicas de modelación constructiva, programación geométrica, optimización estructural, simulación ambiental, algoritmos genéticos y fabricación digital. Se exponen ejemplos en distintas etapas del diseño; en la formulación inicial, el desarrollo intermedio y el refinamiento de elementos. Esos ejemplos consisten en la fachada de un edificio en altura, el volumen de un pabellón y la definición de losas. Estas experiencias demuestran la combinación de aspectos formales y técnicos en la generación del diseño aplicando las consideraciones y técnicas planteadas con el fin de promover la amplia utilización del diseño paramétrico de modo que permita alcanzar un mejor desempeño constructivo y nuevas posibilidades expresivas.

Parametric Design in Architecture; method, techniques and applications

New parametric design technologies have begun to be used in architecture, in particular for temporal exhibits or complex buildings without to clarify general strategies. This paper states methodological conditions in order to apply parametric design to integrate technical features in the building project, in order to improve its performance. It suggest this capacities like a field of design operations, a taxonomy of parameters and diverse techniques of building modeling, geometric programming, structural optimization, environmental simulation, genetic algorithm and digital manufacturing. It exposes three examples in different design phases; the initial exploration, middle development and final definition of elements. In a façade of a medium-rise tower, the volume of a pavillion and design of slabs. These experiences demonstrated combination of formal and technical features in the generation of design, with the conditions and techniques suggested. In order to promote wider use of parametric design to get a better building behavior, as well as new aesthetic possibilities.



Autor

Dr. Arq. Rodrigo García Alvarado

Depto. de Diseño y Teoría de la Arquitectura,
Universidad del Bío-Bío, Concepción,
Chile.

Arq. Arturo Lyon Gottlieb

Escuela de Arquitectura de la Pontificia
Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile,
Chile.

Proyecto Fondecyt 1100374

Palabras clave

Diseño paramétrico
Optimización estructural
Algoritmos genéticos
Fabricación digital
Arquitectura contemporánea

Key words

Parametric design
Structural Optimization
Genetic algorithm
Digital manufacturing
Contemporary architecture

INTRODUCCIÓN.

El diseño paramétrico es crecientemente utilizado en el trabajo arquitectónico, con recursos computacionales de programación geométrica y/o al análisis técnico, en grandes proyectos o instalaciones experimentales (Meredith, 2008). El diseño paramétrico es considerado como utilidades operativas para el desarrollo creativo (Woodbury, 2010) o como un completo nuevo estilo arquitectónico (Schumacher, 2008). Sin embargo, estas experiencias suelen concentrarse en instrumentos o casos específicos, sin definir procedimientos generales. Se han sugerido estrategias de diseño integrado entre Arquitectura e Ingeniería para la resolución de formas complejas (Rappaport, 2011; Holzer et al., 2011), demostrando su aplicación en diversos proyectos arquitectónicos recientes (Turrin et al., 2010; Miller, 2011; Shepherd et al., 2011), para apoyar el desarrollo constructivo y mejor comportamiento de los diseños. En vinculación con sistemas de modelación BIM (Building Information Modeling) y diseño basado en desempeño (PBD: Performance Based Design). A través de la incorporación de condiciones técnicas y elaboración geométrica de la forma arquitectónica, en fases tempranas del diseño. Pero no se ha clarificado una estrategia general de trabajo.

Este artículo propone consideraciones metodológicas generales de diseño paramétrico en Arquitectura para integrar condiciones constructivas y mejorar sus prestaciones, ilustrándolas con tres ejemplos desarrollados, con el fin de promover su aplicación y orientar la contribución de las nuevas tecnologías digitales en el trabajo arquitectónico. Todo ello basado en experiencias previas de los autores (Fig. 1), revisión de casos y capacidades desarrolladas en la investigación FONDECYT 1100374.

El diseño paramétrico considera desde la aplicación de curvas paramétricas hasta la relación de propiedades generales de la edificación y utiliza programación gráfica y/o software de análisis. En general, el diseño paramétrico se refiere a la vinculación entre aspectos formales del proyecto, que se pueden modificar durante su desarrollo (Woodbury, 2010:11), lo que implica nuevos recursos instrumentales y actividades en el diseño arquitectónico.

CONSIDERACIONES GENERALES

El proyecto de arquitectura difícilmente posee una secuencia única de tareas diferenciables y ordenadas debido a que entre el problema y la solución normalmente se mantiene una continuidad interactiva (Broadbent, 1971). Aunque se reconoce un desarrollo progresivo, como también diversos requerimientos, operaciones, relaciones, tareas y resultados, que involucran aspectos técnicos y culturales. No se puede considerar como una metodología exhaustiva, pero se advierte una resolución de la forma, a partir de antecedentes específicos hasta su ejecución material.

Las técnicas de diseño paramétrico conllevan un contexto cultural de práctica y aplicación. Además, involucran trabajos multidisciplinares en los que confluyen determinaciones técnicas y estéticas, lo cual otorga una generación flexible y colectiva del diseño que implica una actitud diferente del arquitecto con relación al proyecto, entregando la tarea creativa a un proceso y equipo de trabajo a través de diversos sistemas digitales empleados, como:

- *Modelación Constructiva (CAD3D – BIM)*: para realizar configuraciones geométricas con asociación de datos y visualizaciones.
- *Programación Geométrica*: para la definición de procedimientos declarativos que manipulan formas, como Grasshoper en Rhinoceros, Generative Components en Microstation, Digital Project en CATIA.
- *Optimización Topológica*: para cálculo resistente por análisis de elemento finito con restricciones de material o comportamiento (Huang y Xie, 2010).
- *Simulación Ambiental*: cálculo de radiación solar, iluminación, ventilación o consumo energético de edificaciones.
- *Algoritmos Genéticos*: para operaciones que evalúan su resultado según una fórmula de efectividad (fitness), utilizando secuencias evolutivas (Goldberg, 1998).
- *Fabricación Digital*: equipamientos para elaborar modelos físicos de información digital mediante acciones de corte, rebaje o solidificación.

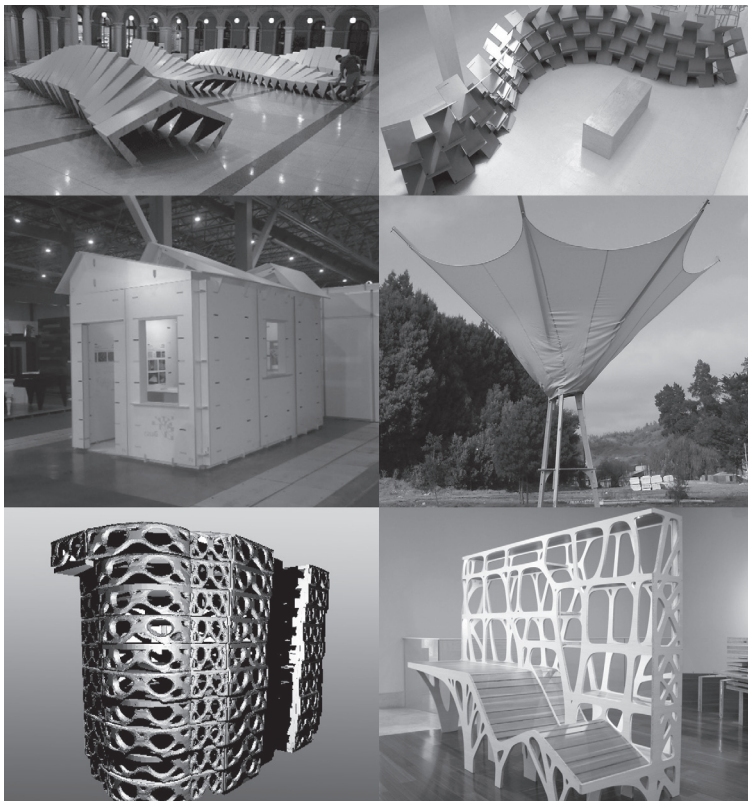


FIGURA 1 | Experiencias de Diseño Paramétrico de los autores; Exposición Umbrales, Muro-Pixel, Casa-G, Tulipas, Optimización de Viviendas Colectivas, Habitacióno Arbórea (autores).

La variedad de recursos disponibles induce a reconocer su aplicación como un «campo de operaciones proyectuales». Es decir, como alternativas de acciones formales no determinantes, lo que amplía el repertorio operativo del diseño arquitectónico, usualmente basado en la composición geométrica o tipológica, hacia un sentido de lógicas proyectuales (Torrent, 2000).

Las técnicas paramétricas en el diseño arquitectónico establecen nuevas alternativas de desarrollo formal que permiten una explicitación e integración de distintos aspectos, por lo que representan una capacidad creativa con una elaboración técnica, en las cuales el rol arquitectónico se distingue por orientar la solución más que por generarla, definiendo condiciones y seleccionando resultados.

Las técnicas paramétricas pueden colaborar en el diseño del proyecto arquitectónico (Fig. 2) en diferentes instancias: a) en la definición de la forma a través de procesos generativos (dependientes de los antecedentes); b) para conciliar aspectos formales según criterios

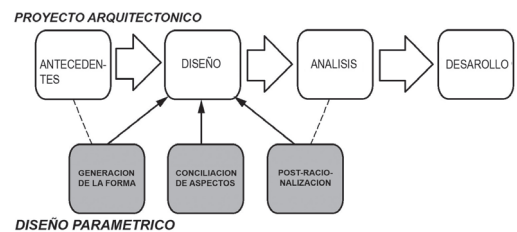


FIGURA 2 | Instancias de aplicación de diseño paramétrico en el proyecto arquitectónico (autores).

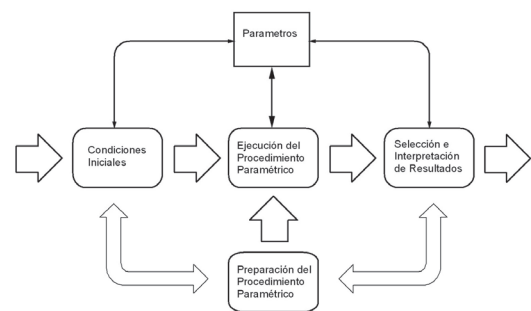


FIGURA 3 | Proceso general de actividades en el diseño paramétrico (autores).

específicos; c) en una posracionalización en la que se refinan características formales de elementos específicos ya definidos en términos generales.

PROCESO DE DISEÑO PARAMÉTRICO

El proceso presenta en general cuatro actividades: la definición de condiciones iniciales, la preparación del procedimiento paramétrico (o selección de una utilidad específica), la ejecución del procedimiento y la selección e interpretación de resultados, además del conjunto de parámetros considerados. Frecuentemente estas actividades y datos se combinan y definen condiciones mientras se prepara o ejecuta el procedimiento, o lo ajustan según los resultados o nuevas posibilidades que se avizoran. Sin embargo, diferenciarlos contribuye a su desarrollo y generalización (Davis et al., 2011). (Fig. 3)

CONDICIONES INICIALES

Las condiciones iniciales son los aspectos del proyecto, del encargo o de su situación, que se consideran en el procedimiento paramétrico. Incluso durante las mismas acciones, como, por ejemplo, usar una fórmula para la generación de cierta variedad de formas. También se puede definir una figura de partida o a desde una fuente externa. Algunas condiciones se advierten después de obtener los resultados, descartando opciones que escapan a requerimientos o posibilidades efectivas. Las condiciones pueden ser conceptuales, límites de desempeño, superficies funcionales, magnitudes o características de la forma (curvaturas, extensión, repeticiones, etc.), las cuales se expresan en operaciones o valores numéricos de manera explícita o intuitiva (por ejemplo, al elegir resultados).

La definición de condiciones debe conformar un sistema de relaciones geométricas posible de ser definido en una plataforma de modelación o programación gráfica. Como en la definición del sistema de catenarias y parábolas de revolución de Gaudí o los modelos de péliculas de jabón de Frei Otto.

PARÁMETROS

Los parámetros tienen la función de expresar rangos, límites y configuraciones específicas. Un mismo modelo paramétrico puede entregar diferentes resultados según varíen los parámetros que lo controlan. La variedad de parámetros puede ser descrita en una taxonomía (Tabla 1). Y reconoce distintas escalas: ambientales (referidas al entorno de localización), globales (del volumen total del proyecto), locales (de elementos parciales) o de producción (de ejecución de algunos elementos). Pueden ser magnitudes geométricas generales o parciales, propiedades materiales intensivas (independientes de la forma) o extensivas (vinculadas a la dimensiones), o relaciones formales. Se los considera expresamente o más implícitamente, pero se aplican algunos con rangos numéricos definidos.

PREPARACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARAMÉTRICO

El procedimiento paramétrico suele ser una acción matemática secuencial a partir de datos numéricos que generan una figura geométrica, configurado como un flujo de datos y operaciones (un algoritmo), algunos con análisis interno de la geometría, selecciones genéticas o cálculos de elementos finitos. A veces se prepara específicamente y en otros casos se utilizan procedimientos existentes que producen un repertorio de resultados o series progresivas (evolutivas).

Los procedimientos se definen usualmente en plataformas de programación visual (*visual scripting*) como Grasshoppers, Generative Components o Digital Project, los cuales poseen diversas funciones programadas; y en ocasiones se utilizan programas de análisis adicionales. Por lo tanto, la preparación consiste muchas veces en elaborar una programación o buscar algunos componentes o programas completos definiendo los antecedentes y acciones y realizando algunas ejecuciones de comprobación.

EJECUCIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARAMÉTRICO

La ejecución del procedimiento se puede reconocer como una acción diferenciada de la preparación, por cuanto corresponde a operar el algoritmo con los datos indicados y generar resultados formales. Se puede ejecutar repetidamente modificando los datos y producir una variedad distinta de resultados. De este modo, podemos considerar este procedimiento como la acción central del diseño paramétrico (aunque escasamente diferenciada), incluyendo su ajuste según los datos y resultados generados.

SELECCIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los procedimientos paramétricos producen finalmente una forma o conjunto de formas que debe ser integrado en el proyecto arquitectónico. Rara vez constituyen el diseño final completo sino una figura relevante que debe ser incorporada y detallada constructivamente. Varios procedimientos generan secuencias en las que el arquitecto puede elegir alguna de las formas aplicando condiciones no previstas al comienzo, como aspectos expresivos, adaptación al lugar, factibilidad constructiva, etc. También puede desechar posibilidades generadas, modificarlas significativamente o realizar otras distintas. Por esta razón, la producción final se

TABLA N°1 | Taxonomía de parámetros.

Parámetros Ambientales (PA)	Parámetros Globales (PG)	Parámetros Locales (PL)	Parámetros de Ejecución (PE)
<i>Datos geográficos:</i> topografía, vistas, tipos de suelo, etc.	<i>Dimensiones o proporciones generales:</i> rangos mínimos y máximos para largo, ancho, profundidad, curvatura, etcétera.	<i>Dimensiones o proporciones de componentes:</i> rangos mínimos y máximos para largo, ancho, profundidad, cantidad, etc.	<i>Dimensiones de producción:</i> tamaño de materiales y máquinas de ejecución.
<i>Datos climáticos:</i> orientación, temperatura, humedad, radiación, vientos, etc.	<i>Requerimientos funcionales:</i> prestaciones de confort, ergonomía, accesibilidad.	<i>Interacción con otros componentes:</i> condiciones de borde y respuesta a configuraciones adyacentes.	<i>Propiedades materiales:</i> rangos de resistencia o flexión.
<i>Situación contextual:</i> restricciones normativas de situación urbana, materialidad, tipología (aislado, pareado, torre, placa, etc.).	<i>Distribución global:</i> relaciones y topología interna.	<i>Respuesta a valores de análisis:</i> profundidad o espesor de las piezas según asoleamiento o solicitaciones estructurales.	<i>Características del producto:</i> color, textura, terminación, etc.
<i>Relaciones del entorno:</i> flujos peatonales, vehiculares, presencia de singularidades, referencias, etc.	<i>Condiciones expresivas:</i> Configuración de fachadas y materialidad.	<i>Condiciones formales:</i> Variación gradual entre componentes.	<i>Valores de aplicación:</i> costos del proyecto.
<i>Dimensiones del sitio:</i> Ancho y profundidad del lote, pendiente, límites de edificación.	<i>Restricciones técnicas:</i> crujiás y voladizos según sistema estructural.	<i>Requerimientos de montaje:</i> tipos de ensamblaje, unión y dilatación entre componentes.	<i>Dimensiones para transporte:</i> magnitudes de vehículos y operación.

debe considerar más bien como una actividad de diseño, compuesta de la selección de la forma así como de su adaptación al proyecto.

El resultado de los procedimientos paramétricos es en sí un archivo geométrico. Estos datos usualmente deben ser traspasados a un sistema de diseño para ser elaborados. En muchos casos se deben efectuar suavizados, escalamientos, desplazamientos o rotaciones para integrarlos en el proyecto. Cuando se elabora en un sistema de modelación constructiva (BIM) o de diseño tridimensional (CAD 3D), las figuras se pueden incorporar al modelo completo, pero en una elaboración tradicional éstas deben integrarse en las distintas vistas. También las figuras corresponden normalmente a siluetas generales, con lo cual debe completarse con trazados o detalles constructivos.

DESARROLLO

La ejecución de un diseño paramétrico en Arquitectura implica un análisis de carácter técnico y/o funcional (en la práctica una combinación de ambos), que permite resolver características globales o parciales dentro de variaciones relevantes. Especialmente en ciertas prestaciones en las que reglas simples o intuiciones generales no logran determinar formas adecuadas. La identificación de estas formas requiere un desarrollo conceptual y operativo en el cual es factible reconocer una prefiguración del proceso y su implementación.

La prefiguración del proceso se puede considerar como la determinación de las condiciones relevantes de variación de la forma, mayormente variables técnicas o expresivas, las cuales deben expresarse en términos numéricos y permiten orientar la selección de los procedimientos matemáticos o computacionales. Estas condiciones consideran rangos dimensionales y topológicos, es decir, magnitudes geométricas que prefiguran la forma para establecer campos de búsqueda, con lo que se pueden seleccionar procedimientos existentes o preparar uno, revisando su ejecución y resultados posibles.

La implementación del proceso paramétrico pasa por la seleccionar o elaborar los procedimientos y por verificar su ejecución, así como por buscar recursos o funcionalidades pertinentes donde se deben revisar los datos requeridos y resultados. La programación específicamente requiere componer utilidades de alimentación y estructuración de datos geométricos, de análisis técnico, luego de ordenación de los resultados para componer las formas, y posteriormente de modelación o visualización final (Barrios, 2006; Madkour *et al.*, 2009). De este modo se puede ejecutar un procedimiento paramétrico en distintas fases del diseño arquitectónico.

EJEMPLOS

Fachada de edificio en altura

En el inicio del proyecto las técnicas paramétricas permiten análisis de comportamiento estructural y energético en la forma general. Esta aproximación se conoce como diseño generativo, ya que a través de distintos procesos algorítmicos se genera una forma según criterios de evaluación establecidos. Este ejercicio se ha concentrado en fachadas soportantes de una torre de oficinas. Se tomó como caso la Torre Santamaría en Santiago de Chile, que es un edificio emblemático del racionalismo moderno. En particular la torre dos, que formaba parte del proyecto original pero no fue construida. El caso planteó repensar el diseño de esta segunda torre asumiendo sus capacidades funcionales establecidas, con procesos generativos implementados a través de técnicas paramétricas y de análisis.

Este ejemplo se desarrolló de dos partes. Una primera exploración realizada en el Curso Tecnologías Aplicadas al Proyecto de Arquitectura (TAPA) se concentró en la modelación paramétrica y BIM de la torre existente, para luego modificar propiedades geométricas del volumen, como también en la definición de nuevos componentes constructivos de fachada asociados a la protección del excesivo asoleamiento. (Fig.4). Estos ejercicios fueron implementados a través de la combinación de tres plataformas. Se utilizó Revit para la modelación BIM del edificio completo; Rhinoceros con Grasshopper para establecer variaciones geométricas sobre el volumen total; y Digital Project para la definición de componentes adaptativos de fachada. Los resultados de las distintas modelaciones paramétricas hechas por grupos de estudiantes fueron prototipados en impresión 3D.

La segunda parte de este ejercicio se concentró en procesos generativos de optimización estructural evolutiva y la posterior integración con análisis de asoleamiento y expresión de la torre. La implementación de diseño generativo de estructura involucró la colaboración de arquitectos e ingenieros estructurales para la definición de soluciones viables desde distintos criterios, como resistencia, desplazamientos, dimensiones mínimas y máximas de elementos constructivos, condiciones de iluminación interior o apertura de vistas relevantes. La torre tiene una estructuración principal a través del núcleo y, sin embargo, cada una de las cuatro fachadas

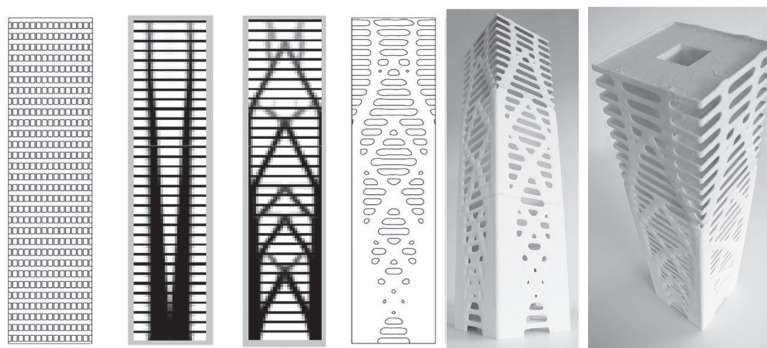


FIGURA 4 | Optimización topológica de la fachada de edificio en altura y prototipado 3D (autores).

incorpora 14 columnas que descargan verticalmente. En un territorio sísmico, se incorporaron al ejercicio las fuerzas horizontales en distintas direcciones que puedan ser absorbidas en parte por los elementos de fachada.

Una primera implementación se realizó a través de rutinas de optimización estructural evolutiva para superficies sometidas a tensión plana (Huang y Xie, 2010) en el software MatLab utilizando librería CALFEM. Este proceso comienza con un dominio limitado de celdas en dos dimensiones al cual se ingresan condiciones de carga y apoyo. Sobre ese dominio, un algoritmo recursivo realiza cálculo de elementos finitos. Luego el algoritmo elimina las celdas que reciben cargas que están bajo un umbral de resistencia definido como parámetro externo. Este proceso se repite llevando al sistema a alcanzar una situación cercana al equilibrio después de aproximadamente treinta iteraciones. El producto de esta optimización evolutiva son formas que producen la mayor resistencia con el mínimo de material. En el caso de la fachada de la torre, se incorporó el resultado en la definición inicial de la forma arquitectónica. Por los altos requerimientos computacionales de los algoritmos de optimización, se trabajó sobre elementos parciales de la fachada de torre que fueron optimizados de acuerdo con las sollicitaciones estructurales que reciben. Se estudiaron elementos equivalentes a un piso completo considerando distintas condiciones y cantidad de apoyos. Cada elemento fue analizado para cada piso, integrando los datos de resistencia requeridos.

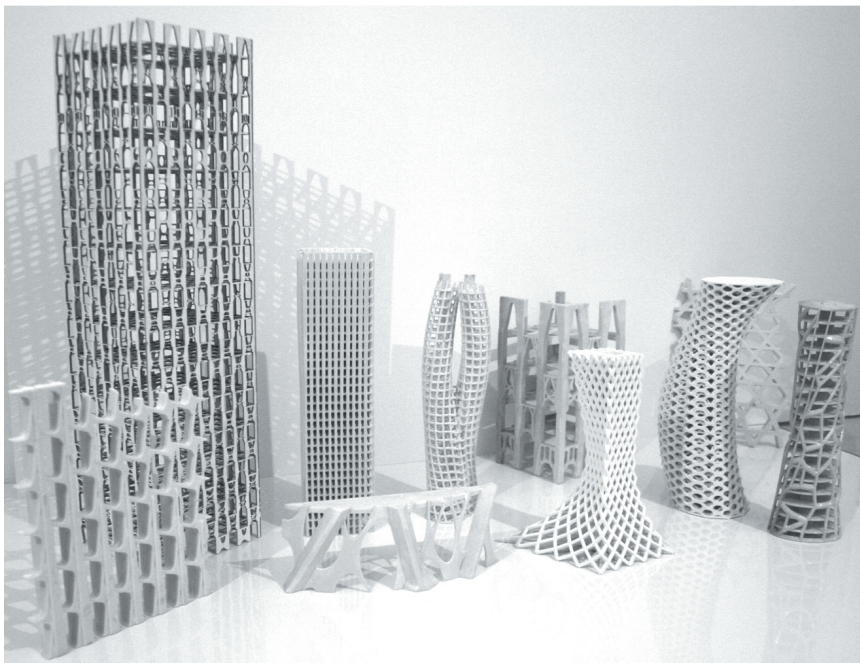


FIGURA 5 | Modelos de diversas configuraciones estudiadas (autores).

También se estudiaron paneles menores en distintas condiciones de carga y apoyo para luego ser distribuidos en cada fachada según criterios de resistencia. Una segunda implementación se realizó a través del método SIMP (Solid Isotropic Material Penalization) basado en la rutina de 99 líneas en MatLab (Sigmund, 2001). Este proceso de optimización estructural evolutiva es similar al anterior, sin embargo, en vez de eliminar celdas de un dominio inicial, define una densidad relativa (30% en este ejercicio), distribuida homogéneamente entre el dominio. El proceso de optimización evolutiva itera, redistribuye las densidades de material para concentrarlo en las zonas más solicitadas por fuerzas de tensión y compresión y vaciar las zonas menos solicitadas. Se consiguió como resultado un mapa de densidades graduadas que fue tomado por estudiantes de Arquitectura como base para la configuración de la fachada de la torre. La transferencia desde MatLab hacia Rhinoceros se hizo de dos formas: por mapas de densidades en escalas de grises a través del componente ImageRaster de Grasshopper, y por la importación de listas de datos desde MatLab. Estos datos se utilizaron para desplazar una superficie NURBS de igual resolución en el dominio optimizado. Cada punto de con-

trol de la superficie es desplazado en dirección normal al plano de fachada, según el mapa de densidades. Luego esta superficie se intersecta con un plano de corte que define un límite entre densidad que serán consideradas llenas y densidades que serán consideradas vacías. Esta estrategia responde a que los materiales que se emplean actualmente en construcción no permiten establecer variaciones de densidades dentro de un elemento. No obstante, la integración entre densidades variables producidas por el método SIMP y componentes constructivos se presenta como un interesante campo de investigación futura asociado a nanotecnologías (Fig. 5).

Se realizaron distintos estudios posteriores sobre la optimización estructural evolutiva para retroalimentar criterios en la fase inicial de diseño arquitectónico. Se consideraron análisis de exposición solar de las fachadas, criterios constructivos para moldajes seriados en prefabricados de hormigón armado, y diversos modelos digitales y físicos en fresado y prototipado rápido para revisar su expresión.

Este ejercicio permitió establecer métodos de diseño generativos en etapas iniciales del proyecto arquitectónico basado en la implementación de parámetros de diseño a través de algoritmos evolutivos y de modelación paramétrica, lo cual requirió trabajo interdisciplinar entre arquitectos e ingenieros estructurales. El ejercicio definió formas más eficientes que permitirían reducir el material utilizado por un edificio vertical para dar mayor resistencia en sus planos de fachada, controlar su exposición solar (y por ende el consumo energético necesario para refrigeración) y actualizar su expresividad arquitectónica. Estos resultados aún deben ser validados por análisis tradicionales que permitan verificar las normativas vigentes y también revisar su ejecución.

Análisis genético de pabellones

La aplicación de diseño paramétrico en etapas intermedias del proyecto arquitectónico, combinando requerimientos, puede ilustrarse con un análisis volumétrico por algoritmo genético. Este ejemplo fue implementado en la plataforma Grasshopper de Rhinoceros con Galápagos como procesador genético, motor solar de Ted Ngai para análisis de radiación y un repertorio de muros con optimización topológica por MatLab. Considerando un pabellón compuesto de dos o tres bloques contiguos, con una superficie general de aproximadamente 80 m², buscando la conformación que otorgue mayor exposición solar, para reducir consumos energéticos por captación pasiva, pero también una óptima configuración estructural. Estas condiciones permiten una capacidad funcional con una amplia variedad espacial y expresiva. Mientras que los requerimientos técnicos son aspectos contrapuestos, por cuanto la exposición solar promueve disposiciones longitudinales y la optimización sísmica fomenta organizaciones centralizadas. En ese sentido, resulta difícilmente intuitivo encontrar una configuración que armonice cabalmente todas estas condiciones.

Se establece una programación de variables geométricas que alimentan un generador de volúmenes con un cálculo de radiación solar que determina una función a maximizar y un procesador genético, además de un clasificador estructural que define capacidades resistentes (Fig. 6). Los volúmenes generados corresponden a paralelepípedos rectangulares contiguos que cumplan un rango de área total, a partir de puntos centrales aleatorios, con alturas regulares. En la programación se establece además una rotación de base para generar distintas alternativas de orientación solar.

El cálculo de radiación utiliza un módulo solar (www.tedngai.net), considera como ubicación geográfica la ciudad de Concepción, Chile, en los solsticios durante 5 horas al día, efectúa el análisis para la volumetría generada y hace una sumatoria total. Luego estos valores se integran en la función del procesador genético que evalúa los volúmenes (Fig. 7). En el análisis resistente se incorporan algunos criterios geométricos de reducción del perímetro, simetría y regularidad, que se analizan en la intersección de los conjuntos volumétricos evaluados. De este modo se obtiene una generación de volúmenes con consideraciones resistentes que luego se clasifican

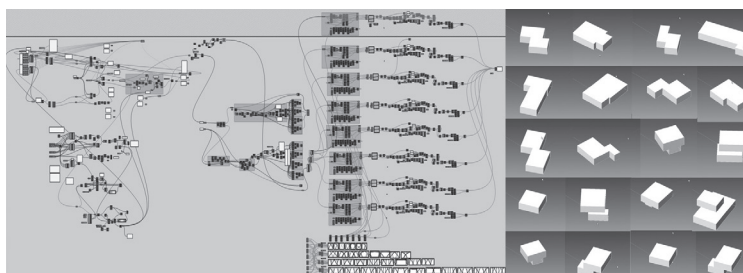


FIGURA 6 | Programación paramétrica para la generación y evaluación de pabellones en Grasshopper y Rhinoceros (autores).

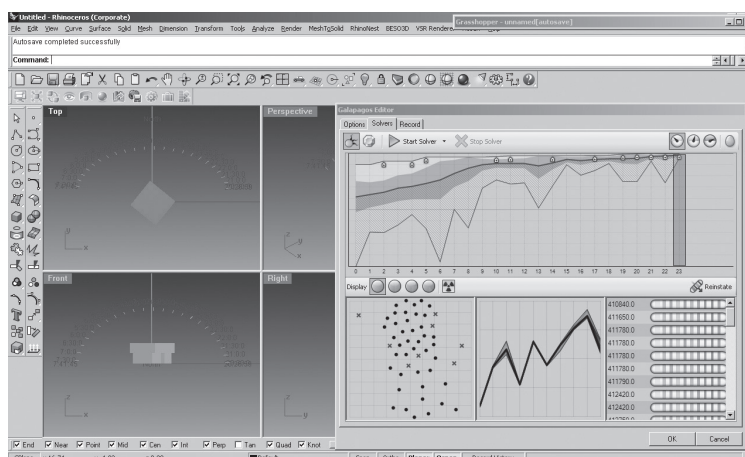


FIGURA 7 | Análisis del pabellón por radiación solar con algoritmo genético de Galápagos (autores).

en casos estructurales (según longitud de muros) para aplicar el repertorio de trazados con optimización topológica. Esto permite obtener composiciones con una selección predominantemente resistente, que se denomina como «máximos locales». En la integración con las evaluaciones de radiación solar se obtienen configuraciones combinadas que se consideran como «máximos globales». Así, la ejecución sucesiva de la programación admite generar volúmenes que se van evaluando progresivamente y convergen en sus condiciones.

Este procedimiento posibilita identificar configuraciones adecuadas en exposición solar y resistencia estructural que se pueden conciliar con otros aspectos arquitectónicos (entorno, circulaciones, etc.). En esta experiencia también se exportaron los volúmenes a modelación tridimensional con paramentos perfilados por optimización topológica mediante la realización de modelos de corte digital con planchas de acrílico (Fig. 8).

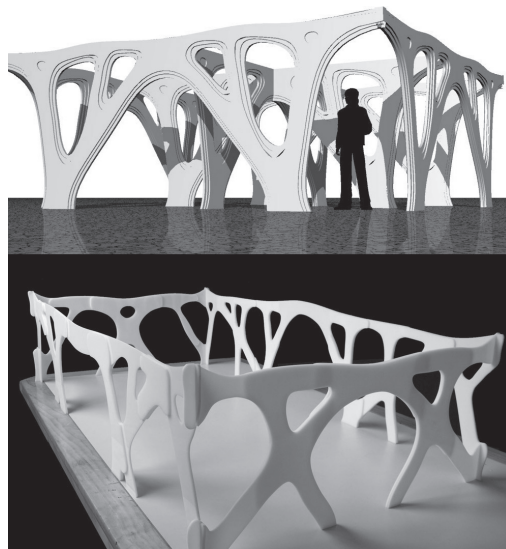


FIGURA 8 | Modelos de pabellones con paramentos optimizados (autores).

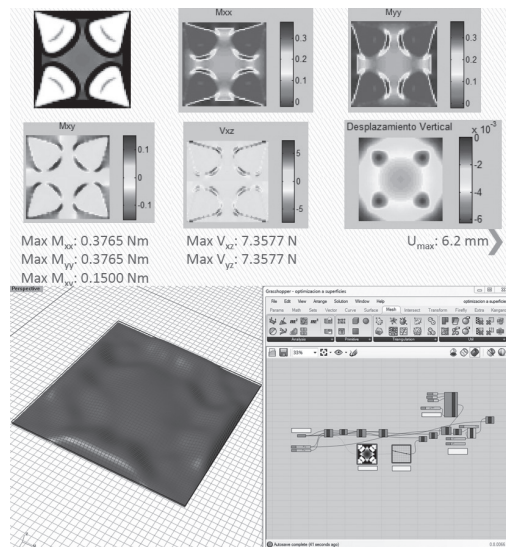


FIGURA 9 | Optimización topológica de losas por elementos finitos y programación volumétrica (autores).

Esta experiencia demuestra la conciliación de requerimientos en la conformación de volúmenes simples, con posibilidades de ejecución constructiva y novedosas expresiones espaciales.

Losas

La integración de procedimientos paramétricos en el refinamiento de componentes constructivos (posraciona-

lización) se ejemplifica en el desarrollo de losas de hormigón armado. Las losas corresponden a elementos de entrepiso arquitectónico que contribuyen al sustento funcional de los niveles superiores, como también al arriostramiento horizontal de la estructura, especialmente en zonas sísmicas. Cuando se disponen en las techumbres poseen esta función de diafragma y cobertura. Asimismo, pueden recibir configuraciones decorativas, soporte de cielos o instalaciones. Debido a que las sollicitaciones de carga y/o arriostramiento son las que definen sus magnitudes principales, las losas se segmentan en modulaciones por elementos de soporte horizontal (viguetas, casetones o vigas perimetrales), de acuerdo con la ocupación del nivel inferior, en consonancia con elementos verticales (columnas o muros). Si se reducen sus dimensiones y variedad formal para una mayor distribución de los esfuerzos, igualmente se requieren losas irregulares, vacíos parciales o voladizos. En este sentido, el desarrollo constructivo de las losas busca su disposición estructural como placas regulares para reducir su desempeño resistente, constituyéndose en uno de los elementos que aporta mayores requerimientos materiales e impacto en energía contenida del edificio, por que suele componerse de productos de alto consumo de carbono (hormigón y acero).

Por eso se experimentó un diseño paramétrico con optimización estructural de placas horizontales cuadradas, con fuerzas principales fuera del plano, que se pudieran aplicar como losas de hormigón armado en una edificación de zona sísmica. Con diferentes tipos de soporte perimetral y cargas, en magnitudes de 6 x 6 m, un espesor máximo de 15 cm y mínimos por ejecución. El análisis inicial se realizó por el método SIMP, con una derivación del algoritmo de 99 líneas en MatLab (Sigmund, 2001), una utilidad desarrollada en FemGV6.1 según procedimiento de Long *et al.* (2009), con una discretización bidimensional de 60x60 unidades para el cálculo de elemento finito, en un cuarto simétrico de la superficie. Aplicando reducción de material del 50% luego de aproximadamente 30 evoluciones, se obtiene una distribución optimizada del material. Luego se verifican magnitudes de momento en los diferentes ejes y desplazamientos máximos de 3 a 6 mm, dentro de la norma sísmica. Se pueden obtener diferentes gráficas bidimensionales o tridimensionales de las diferencias de tensiones y espesores (Fig. 9).

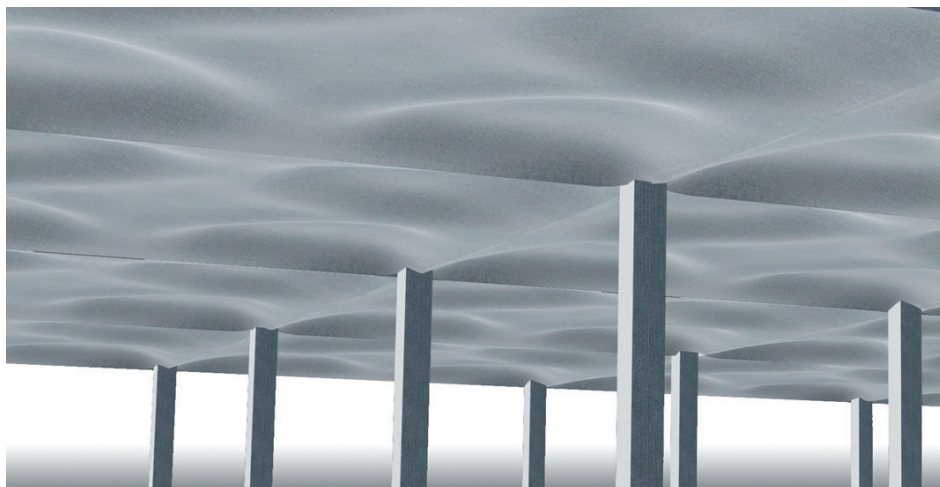


FIGURA 10 | Visualización de losas optimizadas en varios módulos (autores).

Las gráficas o matriz de densidades pueden ser integradas por programación paramétrica para lograr una malla geométrica, lo que fue realizado con Grasshoper en Rhinoceros utilizando WeaverBird y operadores geométricos para generar visualizaciones y distribuir componentes, como también efectuar procesos de manipulación dimensional, o seccionado para mediciones o procesos de fabricación, en particular desarrollo de moldes para ejecución. Se experimentó la realización de moldes por fresado en CNC sobre bases de poliestireno expandido rígido realizando prototipos a escala con mortero de cemento y enfierradura liviana.

Las losas desarrolladas presentan una resistencia adecuada a las solicitaciones requeridas con la mitad del material, lo que implica un menor costo de ejecución y peso e incide en sus esfuerzos generales e impacto ambiental, con una variedad formal que facilita la instalación de soportes, servicios o perforaciones, que puede reducir conflictos de construcción y/o excluir cielos modulares, en particular con ambientaciones especiales de interés decorativo (Fig. 10).

CONCLUSIONES

Esta revisión de estrategias de diseño paramétrico en Arquitectura permite reconocer características relevantes y también diversidades, considerando que no se restringe a la programación geométrica sino en un sentido amplio, al desarrollo formal del proyecto arquitectónico, con la incorporación de condiciones técnicas que contribuyan al desempeño del edificio y la exploración expresiva. Al respecto, se advierten instancias de aplicación y recursos digitales disponibles, se expresan en los ejemplos prácticos la implementación de estos aspectos y su especificidad, y se revelan cuestiones generales y requerimientos operativos como contribución a la diversidad del trabajo arquitectónico.

Este trabajo plantea condiciones generales de las nuevas técnicas paramétricas en Arquitectura y busca, de este modo, impulsar el desempeño arquitectónico. ■



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARRIOS, C.:** *Design Procedures. a computational framework for parametric design and complex shapes in architecture.* Ph.d Thesis, Boston: MIT, 2006.
- BROADBENT, G.:** *Metodología del diseño arquitectónico.* Barcelona: Gustavo Gili, 1971.
- DAVIS, D.; BURRY, J. y BURRY, M.:** «Understanding Visual Scripts: Improving collaboration through modular programming.» *International Journal of Architectural Computing*, Vol. 9, N° 4. Londres: Multiscience, 2011. pp. 361–375.
- GOLDBERG, D.E.:** *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning.* Reading: Addison–Wesley, 1998. p. 412.
- HOLZER, D. y DOWNING, S.:** «Optioneering: A New Basis For Engagement Between Architects and Their Collaborators.» *Architectural Design*, #80. Londres: Wiley, 2010. pp. 60–63.
- HUANG, X. y XIE, Y.M.:** *Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures: Methods and Applications.* Chichester: John Wiley & Sons, 2010.
- LONG, C.S.; LOVEDAY, P.W. y GROENWOLD, A.A.:** «Effects of finite element formulation on optimal plate and shell structural topologies.» *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 45 (11), 2009. pp. 817–825.
- MADKOUR, Y.; NEUMANN, O. y ERHAN, H.:** «Programmatic Formation: Practical Applications of Parametric Design.» *International Journal of Architectural Computing*, Vol. 7, N° 4. Londres: Multiscience, 2009. pp. 587–604.
- MEREDITH, M.:** *From Control to Design. Parametric/Algorithmic Architecture.* Barcelona: Actar, 2008.
- MILLER, N.:** «The Hangzhou Tennis Center: A Case Study in Integrated Parametric Design.» En *Parametricism (SPC) ACADIA Regional 2011 Conference Proceedings.* Nebraska, 2011.
- RAPPAPORT, N.:** «A Deeper Structural Theory.» *Architectural Design*, #80. Londres: Wiley, 2010. pp. 122–129.
- SCHUMACHER, P.:** *Parametricism Manifesto*, en www.patrickschumacher.com. Londres, 2008.
- SHEPHERD, P.; HUDSON, R. y HINES, D.:** «Aviva Stadium: A case study in integrated parametric design.» *International Journal of Architectural Computing*, Vol. 9, N° 2. Londres: Multiscience, 2011. pp.187–204.
- SIGMUND, O.:** «A 99 line topology optimization code written in Matlab.» *Struct Multidisc Optim*, 21; 2001. pp. 120–127.
- TORRENT, H.:** *Arquitectura reciente en Chile: Las lógicas del proyecto.* Santiago de Chile: ARQ; 2000.
- TURRIN, M.; STOUFFS, R. y SARIYILDIZ, S.:** *Parametric Design of the Vela Roof, A case study on performance oriented exploration of design alternatives, 5th. International Conference Proceedings of the Arab Society for Computer Aided Architectural Design.* Marruecos: 2010. pp. 231–240.
- WOODBURY, R.:** *Elements of Parametric Design.* New York: Routledge, 2010.