

UCUENCA

Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Carrera de Arquitectura

Diseño computacional generativo: Pabellón en diseño paramétrico

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Arquitecto

Autor:

Jandry José Cabrera Rodríguez

CI: 1900510817

Correo electrónico: jandrycabrerar@gmail.com

Director:

Arq. Francisco Elías Valdez Apolo

CI: 0104633813

Cuenca, Ecuador

27-enero-2023

Resumen:

La incursión de la computadora en la práctica arquitectónica ha pasado de ser una mera herramienta de representación gráfica a ser un relevante instrumento para la resolución de complejos problemas de diseño. Al aplicar un algoritmo genético, o algoritmo de búsqueda, tratamos de emular los procesos genéticos de la naturaleza (generación, selección, cruce y mutación) para explorar, eficientemente, un vasto espacio de diseño, el cual contiene todas las posibles configuraciones de las soluciones al problema de acuerdo con el tipo, límites y cantidad de variables con las que se diseñe el esquema del objeto en cuestión. Dado que solo se puede optimizar lo que se puede medir, este método no contempla aspectos como el estilo o estética del pabellón y, además, al ser un problema de diseño multi-objetivo, no es posible hallar una solución única, óptima y global que satisfaga de igual manera todas las dimensiones que constituyen al proyecto arquitectónico.

El propósito de la investigación fue explorar el uso de las herramientas de diseño computacional generativo y desarrollar un prototipo de pabellón paramétrico a emplazarse en el contexto del predio universitario. Para esto se plantearon tres objetivos de diseño: minimizar sombra proyectada, minimizar sobrante de corte y maximizar el volumen contenido con el menor peso posible; y tres restricciones: elusión de obstáculos, mantener los largos de las piezas bajo un límite y las deflexiones dentro del rango admisible.

Un total 6 objetivos de optimización y un conjunto de 33 variables con las que el algoritmo trabajó para simular un grupo de 50 individuos a través de 100 generaciones. Como resultado, se obtuvo un grupo de 10 configuraciones válidas y únicas, con cierto nivel de similitud en su expresión formal, para dar solución al problema de diseño arquitectónico planteado.

Palabras clave: Computacional. Algoritmo genético. Diseño generativo. Paramétrico. Multi-objetivo.

Abstract:

The incursion of the computer into architectural practice has gone from being a mere tool for graphic representation to a relevant instrument for the resolution of complex design problems. By applying a genetic algorithm, or search algorithm, we try to emulate the genetic processes of nature (generation, selection, crossover and mutation) to explore, efficiently, a vast design space, which contains all the possible configurations of solutions to the problem according to the type, limits and number of variables with which the scheme of the object in question is designed. Since only what can be measured can be optimized, this method does not consider aspects such as the style or aesthetics of the pavilion and, in addition, being a multi-objective design problem, it is not possible to find a single, optimal and global solution that equally satisfies all the dimensions that constitute the architectural project.

The purpose of the research was to explore the use of generative computational design tools and to develop a parametric pavilion prototype to be placed in the context of the university campus. Three design objectives were set: minimize cast shadow, minimize cutting waste and maximize contained volume with the least possible weight; and three constraints: obstacle avoidance, keep part lengths under a limit and deflections within the allowable range.

A total of 6 optimization objectives and a set of 33 variables with which the algorithm worked to simulate a group of 50 individuals through 100 generations. As a result, a group of 10 valid and unique configurations were obtained, with a certain level of similarity in their formal expression, to provide a solution to the architectural design problem posed.

Keywords: Computational. Genetic Algorithm. Generative Design. Parametric. Multi-objective.

ÍNDICE

Resumen/ Abstract	002
Cláusula de propiedad intelectual	006
Cláusula de licencia y autorización	007
Introducción	010
Objetivos	012
Capítulo 001	
Definiciones Preliminares	013
La máquina y el arquitecto	014
Necesidad y tendencia	015
El dilema de la abstracción	016
Diseño generativo	018
Fabricación digital	021
Diseño computacional en la academia	023
Diseño computacional como movimiento	024
Capítulo 002	
Metodología del diseño computacional	027
Esquema de diseño	028
Espacio de diseño	031
Estructura del esquema	033
Medidas de diseño	035
Objetivos de diseño	036
Manejo de restricciones	037
Algoritmo genético	039
Soluciones óptimas	042
Caso de estudio	044

Capítulo 003

Desarrollo del esquema	049
Limitantes del contexto	050
Consideraciones de materialidad	051
Prototipo de la forma	053
Objetivos de optimización	056
Esquema del modelo	062
Análisis de resultados	063

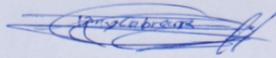
Capítulo 004

Documentación	077
Planos arquitectónicos	078
Detalles constructivos	086
Codificación de piezas	088
Visualización arquitectónica	100
Conclusiones y recomendaciones	102
Conclusiones	102
Recomendaciones	104
Bibliografía y anexos	106
Bibliografía	106
Índice de figuras	108
Índice de tablas	111
Anexos	112

Cláusula de Propiedad Intelectual

Jandry José Cabrera Rodríguez, autor/a del trabajo de titulación "Diseño computacional generativo: Pabellón en diseño paramétrico", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 27 de enero de 2023



Jandry José Cabrera Rodríguez

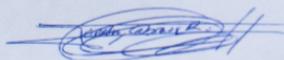
C.I: 1900510817

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Jandry José Cabrera Rodríguez, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Diseño computacional generativo: Pabellón en diseño paramétrico", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 27 de enero de 2023



Jandry José Cabrera Rodríguez

C.I: 1900510817

> Esta página ha sido dejada intencionalmente en blanco.

A la familia con la que nací y la que encontré en este camino.

Introducción

Hace muchos años ya, cuando Christopher Alexander publicó **Tres aspectos de matemática y diseño** (recopilación de varios escritos divulgados entre los años 1964 y 1970) y empezó a reflexionar sobre el uso de la computadora en la práctica arquitectónica, “inicialmente en términos de documentación que pronto mutarían a la habilidad de modelar formas que de otra manera serían difíciles de representar, a través de nuevos conceptos asociados con la virtualidad” (Dong, A., Moere, A., Gero, J., 2007, p. 9). Actualmente, varias décadas después, la práctica arquitectónica ha integrado completamente a la **máquina** en sus actividades de documentación, representación y hasta construcción, pero solo durante los últimos años se ha tratado de considerar a la computadora y sus virtudes en procesos de exploración y optimización del diseño.

Alexander (1980, p. 10) ya se preguntaba qué clase de problemas de diseño podrían ser resueltos por un **ejército de trabajadores**, si pudiéramos pagarlo, asemejando la computadora con este hipotético sinnúmero de dibujantes, mientras que John Henry Holland, en esa misma década, estudiaría sistemas adaptativos complejos y condensaría en su libro de 1975, **Adaptation in Natural and Artificial Systems**, los principios de los algoritmos genéticos. Pero, en primera instancia, la aplicación de la potencia de la computadora en la arquitectura fue la de extender nuestro repertorio de herramientas gráficas, lejos aún de su uso creativo para la experimentación con formas y procesos; evolucionó la forma en la que se elaboraban la gran cantidad de planos que comprendía un proyecto arquitectónico al agilizar todo el proceso de dibujo, correcciones gráficas, exportación de planos, etc., es decir, se minimizaba el tiempo que requerían estos tediosos procesos que requerían de este, a veces literalmente, ejército de dibujantes. Pero, “estas herramientas, al mejorar enormemente la eficiencia de la práctica de dibujo, marginaron aún más las prácticas alternativas” (Mitchell, 2001, p. 354); lo que supuso una ralentización de la evolución de la práctica hacia los usos actuales, pero tal vez necesaria mientras la tecnología continuaba su avance exponencial, ya que “este adelanto se vio facilitado por el desarrollo concomitante de herramientas de diseño paramétrico y scripts que permiten la formulación y ejecución precisas de correlaciones complejas entre elemento y subsistemas” (Schumacher, 2008).

Es innegable que, en las últimas décadas, el paradigma de la arquitectura se ha visto revolucionado por la incursión de las computadoras, ya no solo en la parte mecánica del oficio, sino en los procesos creativos, con finalidades y fundamentos variados: “con la llegada de los sistemas activos, la iluminación artificial, la climatización y otras tecnologías de construcción, la arquitectura empezó a desligarse de las prestaciones del edificio y a centrarse únicamente en la exploración formal” (Fasoulaki, 2008, p. 16). Este enfoque que explica Fasoulaki sobre las tecnologías emergentes en la arquitectura es altamente susceptible de críticas ya que se percibe como una **tendencia** que solo considera la espectacularidad, sin sustancia perdurable. Además, en su artículo de 2007, **Genetic Algorithms in Architecture: a Necessity or a Trend?**, analiza la aplicación de los algoritmos genéticos en la arquitectura y concluye en que una posible solución a este problema sería “la coordinación de herramientas generativas con herramientas de optimización con el fin de lograr un cálculo simultáneo del desempeño y una evaluación global del diseño que surgirá de las funciones orientadas al rendimiento” (Fasoulaki, 2007).

Objetivos

General

01. Desarrollar un pabellón a modo de anteproyecto utilizando herramientas de diseño computacional generativo a emplazarse dentro del predio de la Universidad de Cuenca.

Específicos

01. Investigar el diseño computacional generativo y la metodología más adecuada para su aplicación en el diseño arquitectónico.

02. Desarrollar la propuesta en base a criterios climáticos y constructivos, responsable con el contexto y uso.

03. Generar la documentación necesaria para su construcción a nivel de anteproyecto.

Capítulo 001

Definiciones preliminares

Teniendo en cuenta que no es posible asumir la familiaridad del lector con el tema que se va a tratar en esta investigación, es apropiado que en este primer capítulo hablemos de varios temas que, a forma de una introducción extendida, permitan establecer un contexto en base al cual abordar temas más específicos en el capítulo 02.

La máquina y el arquitecto

El cambio que produjo la tecnología en el paradigma de la práctica arquitectónica no fue algo repentino: Aguirre (2015, p. 1) comenta que la primera irrupción de la **máquina** en la industria se dio a principios del siglo XX con el inicio de la Bauhaus por parte de Gropius. La fuerza bruta de las máquinas contribuyó sustancialmente a la capacidad física del proyectista en beneficio de la producción. Posteriormente vemos una segunda revolución, la del manejo y productividad al elaborar planos, modelados tridimensionales y simulaciones. Finalmente, durante las últimas décadas, no dejamos de leer avances en la computación que dotan a estas largas líneas de **ceros y unos** de unas características similares al raciocinio, que anteriormente pensábamos de uso privado del humano. Esto no implica en absoluto que la máquina sea ahora el diseñador: las funciones del arquitecto se han visto transformadas, sí, sobre todo las actividades tediosas y repetitivas que pueden ser delegadas a la eficiencia con la que las computadoras siguen instrucciones; de esta forma, todas las actividades relacionadas con la imaginación e inventiva humana ahora pueden obtener mayor tiempo y dedicación por parte del diseñador:

“Los puntos fuertes del ser humano, como la creatividad, la intuición, la capacidad de tomar decisiones, etc., se unen a los puntos fuertes de la computadora, como la velocidad de cálculo, el almacenamiento de memoria, la objetividad, las combinaciones alternativas, etc. Sin embargo, la mente humana siempre será el componente clave y la fuerza motriz de un proceso de diseño exitoso”. (Fasoulaki, 2008, p. 44)

De la misma manera, Frazer y Janssen (2003) convienen en que:

En general, las funciones del arquitecto se ven reforzadas en lugar de disminuidas, ya que es posible sembrar muchas más generaciones de nuevos diseños de las que podrían supervisarse individualmente, y alcanzar un nivel de sofisticación y complejidad muy superior a la economía de la práctica normal de la oficina. (p. 21)

Entonces, la **máquina** está aquí para complementar al diseñador: el cálculo de formas, relaciones y distribuciones complejas que se mantenían difícilmente alcanzables sin estas facultades mejoradas ahora son posibles para dotar a la arquitectura de una eficiencia que actualmente es más que necesaria debido a la situación climática y energética, agravada por los requerimientos de la vida contemporánea.

Necesidad y tendencia

Claramente la aproximación al **diseño computacional asistido por algoritmos** (*algorithms-aided design*, AAD, término acuñado por Arturo Tedeschi en 2014) es diferente en comparación con el **tradicional**. Como se mencionaba antes, se requiere de una mentalidad y disposición distinta para lograr trasladar las inquietudes de diseño a una sintaxis que pueda ser comprendida y manejada por la computadora; además que, en palabras de Hesselgren (2011), el diseño generativo no consiste en diseñar el edificio, sino en diseñar el sistema que lo compone (Figura 001).

En primera instancia, nos hace frente el dilema de definir qué es realmente una necesidad dentro de los objetivos de una edificación; Alexander (1980, p. 75) expone que aún habiendo formulado claramente estos puntos, no existe una manera de saber a ciencia cierta cómo éstos se traducen a formas o geometría que los satisfagan. Y aún más, ¿estos requerimientos realmente son los que **debe** cumplir? ¿Cómo determinamos si algo realmente es una necesidad? En la academia es simple, leemos la lista de criterios, objetivos, especificaciones de funcionamiento y actividades a realizarse en la edificación; esto como parte de nuestro entrenamiento para la práctica profesional, ya que los clientes nos proveerán, con exactitud variable, de estas características deseadas para su proyecto, algunas físicamente tangibles y otras tal vez haciendo referencia a sensaciones o experiencias que la obra debe provocar.

Entonces, como profesionales debemos asesorar al cliente ya que muchas veces ellos no son conscientes de sus necesidades reales, y puede que me-

nos aún nosotros aunque nos dediquemos a observar sus rutinas, “no podemos decidir lo que es **realmente** necesitado ni preguntando ni observando desde afuera, porque el con-

FIGURA 001 Diagrama del diseño computacional

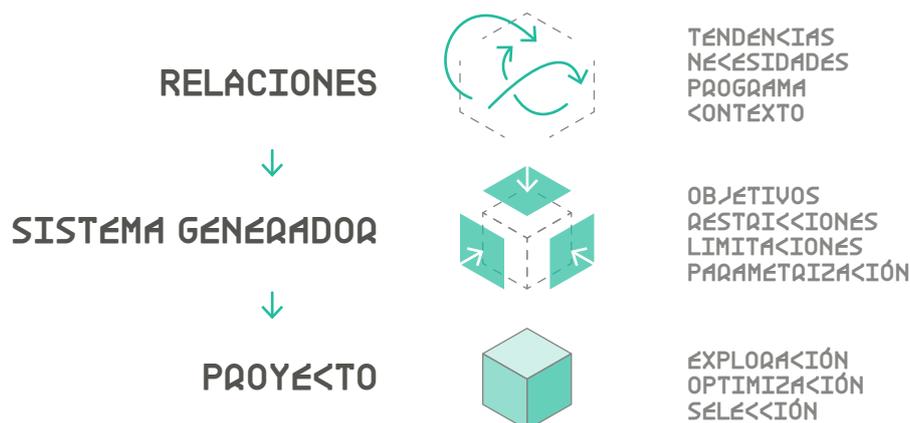


FIGURA 001 El diseño computacional examina la lógica interna y las relaciones latentes entre los elementos de un diseño.

cepto de necesidad no está bien definido” (Alexander, 1980, p. 77). Tomando esto en cuenta, Alexander (1980, p. 78) propone el reemplazar esta idea de necesidad por el concepto de **tendencia**, que hace referencia a lo que los usuarios buscan realizar. Cambia la pasividad de esperar una solución, por la acción de buscar activamente satisfacer esa necesidad. Al formular una tendencia estamos creando una hipótesis: observamos y formulamos las relaciones que comprende dicha acción o evento con el propósito de encontrar una relación geométrica o numérica que se pueda trasladar a un espacio tangible. Entonces, al exponer esta serie de relaciones, indudablemente existirán conflictos, naturalmente o bajo ciertas condiciones; debido a esto, el diseñador debe procurar que el medio ambiente, a través del diseño, no contenga dos tendencias que entren en conflicto y que, por lo tanto, asegure al usuario la posibilidad de satisfacer sus necesidades. Además, Alexander (1980, p. 84) determina que las características que causan y previenen conflictos individuales no son piezas concretas como por ejemplo ladrillos o puertas, o techos o calles, son las relaciones geométricas entre esas piezas.

En resumen, este análisis que realiza Alexander desde el concepto mismo de necesidad es el patrón de razonamiento que debemos seguir dentro del diseño computacional: **estudio de las tendencias, extracción de relaciones geométricas, formulación de coeficientes medibles y depuración del sistema generador.**

El dilema de la abstracción

Dado que un proyecto arquitectónico es una composición de sub-sistemas de diseño complejos que interactúan entre sí e influyen mutuamente en sus rendimientos (Figura 002), puede existir disonancia entre la forma y el desempeño de la edificación, de modo que una práctica común es supeditar uno de éstos al resultado del otro.

...de hecho, ha sido un tema central a lo largo de la historia de la teoría y la práctica arquitectónica. Un ejemplo representativo es la conocida frase: **la forma sigue a la función**. Todo el debate radica en que la arquitectura es una combinación de arte y ciencia, forma y rendimiento. Por lo tanto, un diseño debe cumplir tanto los requisitos estéticos como los funcionales. (Fasoulaki, 2008, p. 27)

FIGURA 002 Dualidad de las características de la arquitectura

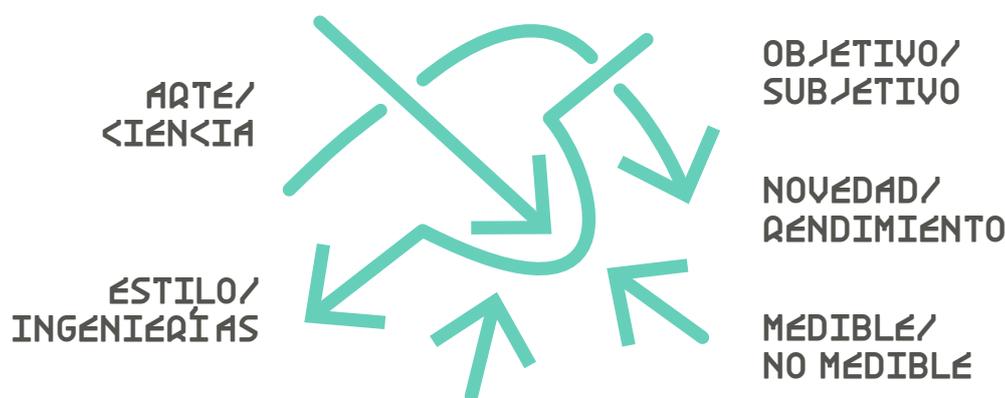


FIGURA 002

La dualidad de la arquitectura supone un reto al formular criterios de aptitud que engloben todas las particularidades de un diseño.

Esta dualidad innata de la práctica arquitectónica también genera dificultades en el proceso de ‘explorar las reglas y las pautas conceptuales y por medio de las matemáticas

poder establecer las variables en términos de organización y relaciones’ (Aguirre, 2015, p. 1) puesto que no se puede abordar este procedimiento de la misma forma para las características abstractas que componen un proyecto arquitectónico, difícilmente traducibles a relaciones geométricas, como la estética, que para los requerimientos que sí pueden ser, con mayor o menor dificultad, medidos y que responden generalmente a sistemas de funcionamiento asociado a las ingenierías de la edificación.

Por lo tanto, al no poder cuantificar ciertos criterios del proyecto, recae en el diseñador la tarea de discernir qué opción es más viable: “los prejuicios del diseñador limitan el proceso de exploración de posibilidades de diseño que estén fuera del parecer subjetivo del diseñador” (Krish, 2010); de esta manera se genera una infra-exploración y sobre-orientación de los diseños.

Los arquitectos deben hacer sacrificios relacionados con la generalización y reduccionismo de algunos de los problemas de diseño. Es necesario realizarlo para transformar la mayoría de los problemas vagamente definidos, que están relacionados con el subconsciente y la subjetividad del arquitecto, como la intención de diseño, en problemas claramente definidos, a través de la codificación. (Fasoulaki, 2007)

De tal modo que, al dejar de lado la forma como elemento inaugural del proceso de diseño, debemos buscar lo esencial, la sustancia irreductible que constituya de forma inequívoca la columna de nuestro proyecto: las relaciones lógicas; y, finalmente, destilar de ellas números y relaciones geométricas que podamos trasladar a variables, parámetros y algoritmos que generen soluciones factibles a los problemas de diseño en cuestión.

Es necesario señalar la diferencia entre los términos parámetro y variable ya que muchas veces son considerados como la misma entidad: Fasoulaki (2008) explica que los parámetros son cantidades que afectan a los objetivos de diseño u optimización pero que suelen considerarse fijos o no modificables por los diseñadores. Esto no niega que en cierto punto el diseñador convierta un parámetro en variable para ampliar el espacio de diseño o viceversa; se logra determinar valores óptimos para ciertas variables y se les suprime su capacidad de cambiar en cada iteración (Fasoulaki, 2018, p. 18). Además, según la explicación de Alexander (1980, p. 87), una relación es una disposición geométrica precisa que previene un conflicto, verbalizada de modo que incluya las disposiciones que prevengan el conflicto con otras relaciones y a la vez excluya todo lo que lo cause; y de esta forma proveen, axiomáticamente, de una base sólida para la formulación del código generador de nuestro proyecto.

Diseño generativo El diseño generativo es la técnica de **búsqueda** de soluciones dentro de un límite, o espacio de diseño, con el afán de emular los procesos evolutivos de la naturaleza aplicados al diseño a través de la exploración de innumerables posibles soluciones dentro de una población de estudio (Figura 003). Comprende tres partes:

01. Esquema de diseño.

Formular un sistema **generador** de posibles soluciones dentro de un **espacio de diseño** delimitado.

02. Objetivos de diseño.

Definir medidas para **evaluar** el rendimiento de cada iteración.

03. Algoritmo genético.

Aplicar un algoritmo evolutivo para **explorar** el espacio de diseño y encontrar las soluciones con mejor **rendimiento**.

FIGURA 003 Componentes generales del diseño computacional generativo

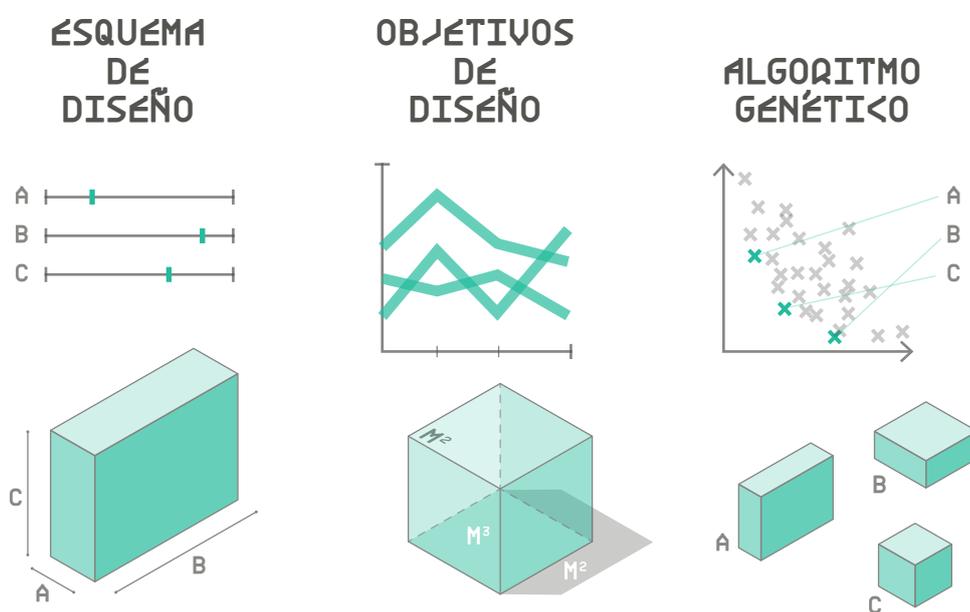


FIGURA 003

El éxito del diseño generativo depende, parcialmente, de la maleabilidad del esquema para explorar sin errores el espacio de diseño y la claridad de los criterios de aptitud para guiar correctamente al AG.

El medio para configurar el **esquema de diseño** es un entorno de **programación**, un término que genera cierto respeto entre quienes no estamos familiarizados con el tema; ventajosamente, existen lenguajes de programación del tipo **visual** (**visual programming language**, VPL) donde

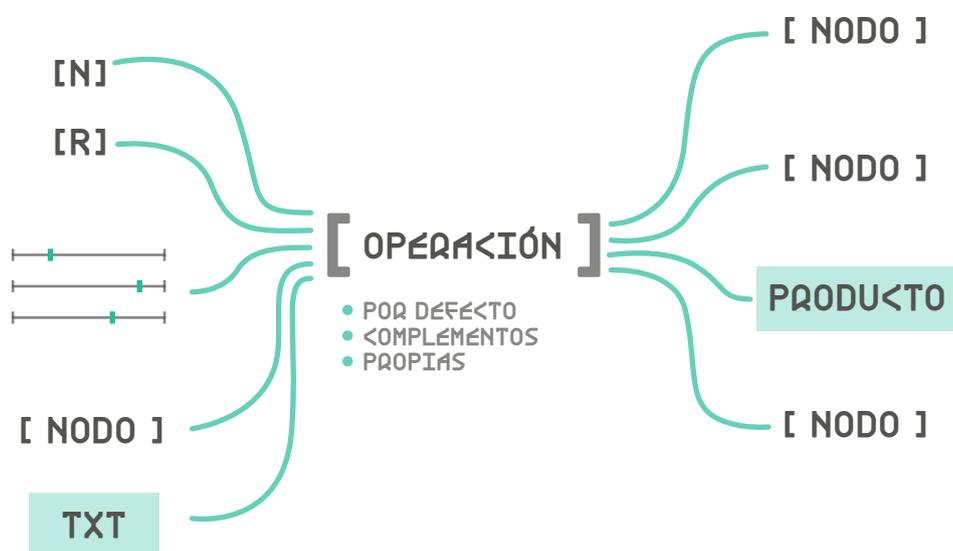
los elementos que componen el algoritmo se expresan como **nodos** con **entradas** y **salidas** para conectarse entre sí y componer la intención de diseño (Figura 004). Los nodos representan información, geometrías, variables, algoritmos, etc., además de las relaciones o reglas entre ellos: “las reglas de los sistemas generativos pueden definirse de diferentes maneras, por ejemplo con gramáticas verbales, diagramas, conjuntos de transformaciones geométricas o scripts” (Fasoulaki, 2008, p. 10).

Posterior o paralelamente, se deben formular los objetivos de optimización para poder evaluar el rendimiento de la iteración y que serán uno de los componentes básicos del algoritmo evolutivo, junto con las variables. Las iteraciones pueden crearse usando únicamente números aleatorios, pero en este caso necesitamos las características adicionales que aporta un **algoritmo genético** y que, como su nombre indica, hacen referencia a la genética y la biología; Nagy (2017) explica que son una forma de **inteligencia artificial** conocida como **metaheurísticos**, o simplemente **algoritmos de búsqueda**. “Los algoritmos heurísticos siguen un conjunto sencillo de reglas para devolver en un tiempo de cálculo mínimo una solución **aceptable y aproximada** a

un problema de diseño” (Fasoulaki, 2008, p. 19). Otros tipos, como las **redes neuronales** (de mayor complejidad), no son aplicables debido a que los modelos paramétricos con los que trabajamos en la práctica arquitectónica no pueden ser **entrenados** para encontrar una solución óptima global; de tal modo que necesitamos un sistema independiente del modelo que lo examine y valore sin conocer directamente su funcionamiento interno. “Estos algoritmos se basan en la comprobación repetitiva de un modelo en lugar de su resolución directa, se denominan algoritmos **estocásticos**, lo que implica que al menos una parte de su funcionalidad puede atribuirse a acontecimientos **aleatorios e imprevisibles**” (Nagy, 2017).

En resumen, “la ventaja de este enfoque es que el diseñador puede cambiar sólo unos pocos parámetros y el resto del modelo puede reaccionar y actualizarse en consecuencia” (Jabi, 2013, p. 9), debido a que “en vez de modelar una forma externa, articulan una lógica generativa interna, la cual después produce, automáticamente, un rango de posibilidades de donde el diseñador puede elegir una solución formal apropiada para continuar su desarrollo” (Kolarevic, 2003, p. 11).

FIGURA 004 Diagrama de un nodo y sus conexiones



Todo el proceso de diseño se trabajará dentro del software **Rhino-ceros 3D**, gracias a su extensión nativa **Grasshopper** como lenguaje de programación visual y **Wallacei** como motor evolucionario y analítico para la aplicación del algoritmo evolutivo **NSGA-2**, además de la selección y visualización de resultados.

FIGURA 004 Cada nodo implica una operación con la información de entrada y produce un resultado que alimentará el siguiente nodo de la cadena.

Fabricación digital El factor tecnológico dentro del campo de la construcción en nuestro contexto no ha mostrado grandes avances en la fabricación asistida por computadora (**computer-aided manufacturing**, CAM), aunque los programas CAD (**computer-aided design**) ya son utilizados desde hace muchos años. Esta proyección física de la información de construcción no convencional supone un costo de inversión difícilmente asumible para el contratista promedio, más aún cuando se desconocen sus virtudes y desventajas. Además, esta tecnología es relativamente reciente en todo el mundo, Kolarevic (2003, p. 2) comenta que sólo en los últimos años los avances en las tecnologías de diseño asistido por computadora y de fabricación asistida por computadora han empezado a tener un impacto en las prácticas de diseño y construcción de edificios; han abierto nuevas oportunidades al permitir la producción y la construcción de formas muy complejas que, hasta hace poco, eran muy difíciles y costosas de diseñar, producir y ensamblar con las tecnologías de construcción tradicionales (Figura 005).

La fabricación CAD/CAM ofrece una forma de producir elementos singulares a través de procesos de elaboración con maquinaria por control numérico (**computerized numerical control**, CNC) o impresión en 3D, manteniendo los costos de producción **relativamente sobre el presupuesto**. Cabe mencionar que esta complejidad en el diseño y producción es también consecuente en el ensamblaje, pero de igual manera, la información del modelado nos puede proveer la ubicación exacta de cada pieza, además de facilitar la visualización detallada de encuentros de ensambles complejos (Mitchell, 2001, p. 361).

Es indudable que los elementos de construcción regulares son más baratos de fabricar que los complejos, además, gracias a la estandarización de ciertos componentes y su producción a gran escala, se abarata aún más los costos de producción, pero un edificio es más una obra única en lugar de un producto fabricado en masa. En cualquier edificio existe un equilibrio particular entre los elementos que se repiten y los únicos, lo que da a la arquitectura gran parte de su carácter. Además, existen razones lógicas para variar ciertos elementos arquitectónicos, por ejemplo: dimensiones de miembros estructurales de acuerdo con su carga, ventanas de acuerdo a su orientación, entre otros (Mitchell, 2001, p. 360). Mitchell también comenta que,

FIGURA 005 Sistema ortogonal y sistema adaptable

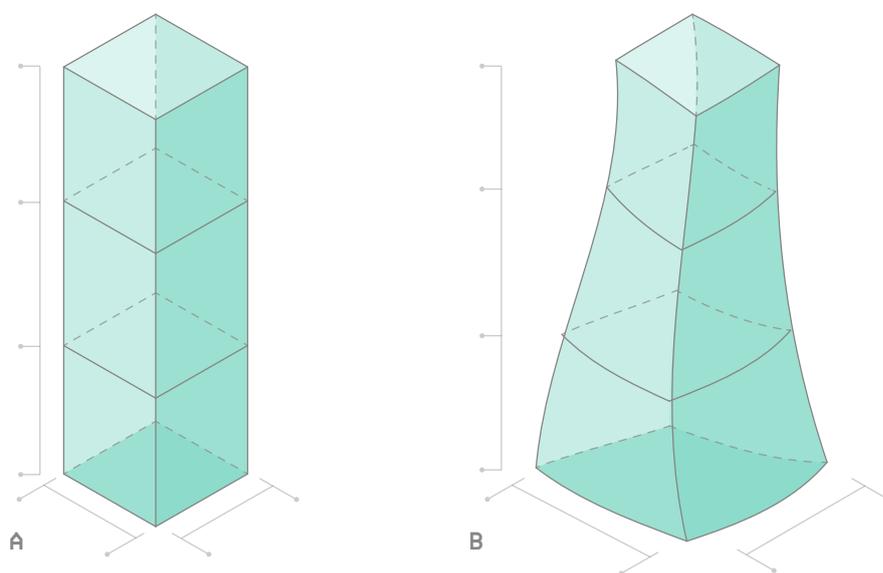


FIGURA 005

Al abandonar el compromiso con las configuraciones estructurales de orden rígido se abren nuevas posibilidades de priorizar otros objetivos de diseño como los referentes al rendimiento del proyecto.

desde el punto de vista técnico, gracias a los avances tecnológicos, la simplicidad y la regularidad ya no importan. Lo argumenta explicando que las fórmulas de análisis estructural que dolorosamente había aprendido en la facultad de arquitectura estaban restringidas

a vigas rectangulares, columnas circulares, arcos, bóvedas, etc., mientras que un software de análisis de elementos finitos podría calcular, eficiente y precisamente, estructuras de prácticamente cualquier forma. Por lo tanto, el orden y rigidez de composición estaban ligados, estructuralmente, a las posibilidades de cálculo de la época, por lo tanto “si los diseñadores quieren destacar estas cualidades, ahora deben hacerlo por otros motivos” (Mitchell, 2001, p. 359).

Kolarevic (2003, p. 2) explica que estos avances tecnológicos suponen un vínculo directo desde el diseño hasta la construcción y que las consecuencias serán profundas, ya que los nuevos procesos de diseño, fabricación y construcción impulsados por la tecnología digital desafían cada vez más la relación histórica entre la arquitectura y sus medios de producción. En conclusión, cambia el paradigma de la construcción: el diseñador adquiere mayor libertad creativa ya que no depende de los productos catalogados que ofrece la industria sino se comunica con ella, conoce sus posibilidades de fabricación y conjuntamente producen elementos personalizados dentro de esas capacidades para unos requerimientos específicos.

Diseño computacional en la academia

Frazer (1995) ya proponía la sustitución del método de prototipo-retroalimentación en la construcción de la arquitectura vernácula por el modelado y simulación por computadora (p. 66) y es aún más pertinente esta recomendación en nuestros días dado que aunque sí se utilice software de simulación para comprobar el correcto funcionamiento climático y estructural del proyecto arquitectónico, esto suele relegarse a posteriores etapas en la fase de diseño. De nuevo el ensayo-error que comenta Frazer (1995): “los diseñadores tienden a confiar sus preconcepciones intuitivas y modificarla hasta que funcione, siendo **funcione** a menudo interpretado en una manera casi mística más que en un sentido funcional” (p. 66).

“Aunque el método propuesto puede utilizarse para la optimización del modelo, su valor principal radica en su uso en las primeras etapas de diseño en las que el CAD apenas se utiliza actualmente” (Krish, 2010); de esta forma se podrá hacer un análisis temprano de la factibilidad de las estrategias del proyecto y evitar cambios sustanciales en etapas posteriores donde representarían una cantidad exponencial de recursos, dado que “las decisiones tomadas en las primeras fases de diseño suelen tener el mayor impacto no sólo en el rendimiento global del edificio, sino también en el coste total” (Fasoulaki, 2008, p. 32).

Según Mitchell (2001, p. 354), “los arquitectos tienden a dibujar lo que pueden construir, y construir lo que pueden dibujar”, por lo tanto, estas limitaciones de la práctica tradicional en cuanto a representación se convierten en limitaciones ya no solo constructivas sino además de concepción del proyecto. Como se comentó anteriormente, “el uso de la computadora, y las dificultades que implica, ya requiere de una **forma mentis**, una determinada actitud más lógica, dejando las intuiciones en las que el arquitecto acostumbra a confiar” (de Rubertis, 1985, como se citó en Sainz, 1992). Finalmente, según Roudavski y Walsh (2011, p. 579), la enseñanza del diseño computacional es necesaria dado que “la adopción temprana de la fabricación digital expone a los estudiantes al pensamiento basado en procesos y materiales de la arquitectura contemporánea en un momento en el que se forman actitudes duraderas hacia el diseño”; y de este modo, encaminarse a un aprendizaje integrado de teoría, técnica, materialidad y simulaciones pertinentes a la práctica arquitectónica actual.

Diseño computacional como movimiento

Tras estos avances, es ineludible el surgir de una nueva corriente que busque condensar sus ventajas e ideales para justificar su práctica: responde al término **parametricismo**, acuñado en 2008 por Patrick Schumacher (director de Zaha Hadid Architects), y busca retratar al movimiento como el gran nuevo estilo que sigue al racionalismo, que nace gracias a avances como la producción en serie y la normalización de elementos, ocasionados por esa primera intervención de la **máquina** en la industria; “el posmodernismo y el deconstructivismo han sido episodios de transición que marcaron el comienzo de esta nueva oleada de investigación e innovación” (Schumacher, 2008). El parametricismo sostiene todas sus decisiones de diseño con lógica, busca optimizar materiales y procesos, antepone la función por sobre la forma, y constata la información con simulaciones que retroalimentan al diseño, mientras que abre la posibilidad de generar formas complejas de manera novedosa y también construirlas con presupuestos razonables (Kolarevic, 2003, p. 10); todo esto a través de avances tecnológicos en computación y fabricación digital.

Schumacher (2008) explica que el avance del parametricismo se corresponde tanto con el avance tecnológico del diseño computacional como con la ejecución por parte del diseñador de estas oportunidades formales y organizativas únicas, por tanto, el progreso a nivel de herramientas y técnicas paramétricas no es suficiente para el éxito de esta corriente arquitectónica, debe ir acompañado de una forma de entender el diseño mucho más lógica y analítica.

El movimiento paramétrico “se refiere a todas las tareas del diseño, desde el urbanismo hasta el nivel de detalle tectónico, el mobiliario interior y el mundo de los productos” (Schumacher, 2008), es decir, no se resigna al diseño de la forma de una cubierta o al relieve en madera para dar dinamismo a una pared interior, tiene el potencial de estudiar configuraciones sociales a escala urbana o determinar las uniones óptimas de piezas en detalles arquitectónicos. Cabe mencionar que estas diferentes escalas no presentan un mismo avance en este campo, Lars Hesselgren (director de investigación en la oficina **PLP Architecture**), en una entrevista del año 2011, comenta que “un área interesante va a ser la planificación general, porque es un área en la que el enfoque de las herramientas paramétricas, digitales y conceptuales todavía no es muy fuerte” (Kocatürk, T., Benachir, M., 2011, p. 248).

Referencias

- Alexander, C. (1980). *Tres Aspectos de Matemática y Diseño: La estructura del medio ambiente* (Beatriz de Moura, Trad.) (2da ed.). Tusquets Editores.
- Dong, A., Moere, A., Gero, J. (Ed.). (2007). *Computer-Aided Architectural Design Futures 2007*. Springer.
- Mitchell, W. (2001). Roll Over Euclid: How Frank Gehry Designs and Builds. En Ragheb, J. (Ed.), *Frank Gehry, Architect* (352-363). Guggenheim Museum Publications.
- Schumacher, P. (14 de septiembre-23 de noviembre de 2008). *Parametricism as Style – Parametricist Manifesto*. 11º Bienal de Arquitectura de Venecia, Italia.
- Fasoulaki, E. (2008). *Integrated Design: A Generative Multi-Performative Design Approach* [Tesis de maestría, Massachusetts Institute of Technology]. Repositorio del MIT. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/43750>
- Fasoulaki, E. (2007). *Genetic Algorithms in Architecture: a Necessity or a Trend?*.
- Sainz, J. (1992). *Infografía y arquitectura: dibujo y proyecto asistido por ordenador*. Nerea.
- Aguirre, S. (2015). Procesos generativos de diseño. Diseño Generativo, el computador como instrumento de creación. *Actas de Diseño* (19), 147-150.
- Kolarevic, B. (Ed.). (2003). *Architecture in the Digital Age. Design and Manufacturing*. Spon Press.
- Frazer, J. (1995). *An Evolutionary Architecture*. Architectural Association Press.
- Jabi, W. (2013). *Parametric Design for Architecture*. Laurence King.
- Roudavski, S., Walsh, A. (2011). The Headspace project: Computer-assisted fabrication as an introduction to digital architectural design. *Circuit Bending, Breaking and Mending: Proceedings of the 16th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*, 579-588.
- Frazer, J., Janssen, P. (2003). Generative and Evolutionary Models for Design. *Communication & Cognition* (36), 187-215.
- Krish, S. (2010). A practical generative design method. *Computer-Aided Design* (43), 88-100.
- Nagy, D. (23 de enero de 2017). *The problem of learning*. Medium. <https://medium.com/generative-design/generative-design-introduction-64fb2db38e1>
- Kocatürk, T., Benachir, M. (Ed.). (2011). Interview with Lars Hesselgren, Director PLP Research. *Distributed Intelligence in Design*, 247-251.

> Esta página ha sido dejada intencionalmente en blanco.

Capítulo 002

Metodología del diseño computacional

En este capítulo se expondrán cuestiones específicas a la metodología del diseño computacional generativo, desde el esquema o 'genoma' del diseño específico hasta los objetivos y restricciones que dirigirán los procesos genéticos para satisfacer el problema de diseño.

Esquema de diseño Alexander (1980) explica que un sistema generador dicta las normas y posibilidades para que sus elementos cooperen y se organicen para componer un sistema que funcione como un **todo** (sistema holístico); éstos “se caracterizan por una estructura similar a la de los cromosomas de la naturaleza” y “representan una forma codificada de parámetros que controlan la resolución del problema investigado” (Frazer, 1995, p. 58). En los sistemas naturales, las formas son el resultado de fuerzas que interactúan legalmente bajo normas que aún no podemos comprender enteramente y no se pueden descomponer fácilmente en subsistemas (Schumacher, 2008); ésta es la coherencia que busca el diseño generativo, una complejidad organizada que desafíe al paradigma de diseño actual y conecte, nuevamente, la arquitectura con la naturaleza. Fasoulaki (2007) explica que esta capa de complejidad introducida a la arquitectura no puede ser resuelta por métodos convencionales de diseño, es decir, esta importante cantidad de datos, relaciones y formas precisan de otras técnicas de resolución de problemas en las que la tecnología, indudablemente, juega un papel crucial.

Frazer y Janssen (2003) comentan que, comúnmente, los sistemas generadores predefinen un diseño existente y se **parametrizan** los componentes que se cree que deben mejorarse; lo que es cierto si solamente consideramos la parte de **optimización** del proyecto, pero que de igual manera nos es útil ya que “como base, podemos extraer cada decisión tomada durante un proceso de diseño como una dimensión potencial del espacio de diseño” (Nagy, 2017). De nuevo tomando como referencia a la explicaciones de Nagy (2017), se conoce como **espacio de diseño** al espacio conceptual multi-dimensional que contiene todas las posibilidades formales únicas de un esquema de diseño determinado, cuyas dimensiones corresponden a cada variable independiente que dirige al sistema (Figura 006). Dentro de este hipotético espacio, cada punto representa un diseño único que responde a una combinación específica de sus variables. Pero al traducir cada decisión de diseño en una variable sin excepción o filtro de ningún tipo, el espacio de diseño resultante sería extremadamente complejo y provocaría que el **algoritmo de búsqueda** sea incapaz de navegar por las iteraciones eficientemente.

FIGURA 006 Espacio de diseño

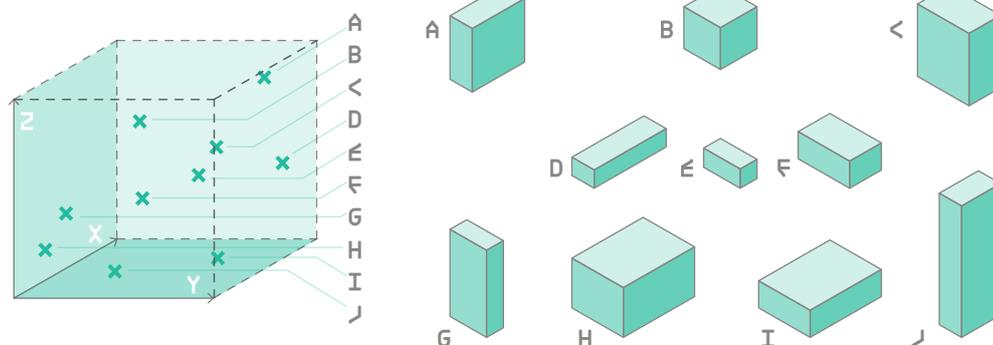


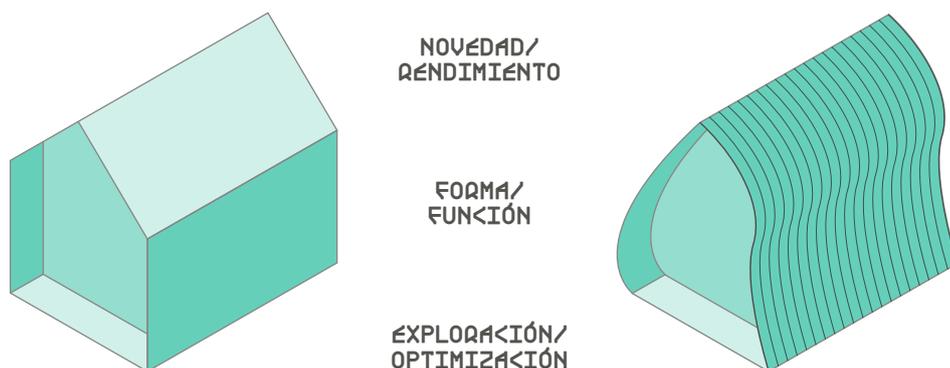
FIGURA 006

Un espacio de diseño bien formulado permite encontrar soluciones no evidentes del problema de diseño a través de una exploración eficiente.

Nagy (2017) considera varias nociones que influyen en nuestro enfoque de la **codificación** del esquema de diseño. En primer lugar está la **novedad frente al rendimiento**; como diseñadores,

tendemos a buscar nuevas técnicas para resolver un problema o tecnologías para nuestra práctica, pero esto no necesariamente se traduce en un mayor rendimiento del producto en cuestión, muchas veces es solamente exploración formal (Figura 007); y en nuestro caso, la arquitectura, un desempeño pobre de una edificación representa costos elevados, incomodidad o hasta el fracaso de la estructura. Fasoulaki comenta que “de hecho, es muy difícil para un diseñador combinar la complejidad y las restricciones impuestas por el problema de diseño con la generación formal evolutiva” (2007); debido a esto, “tendemos a dividirlo en una serie de partes más pequeñas que podemos considerar individualmente. Como resultado, a menudo tomamos decisiones sin comprender del todo cómo afectarán a otros aspectos del

FIGURA 007 Novedad frente a rendimiento



diseño” (Nagy, 2017), y de esta manera obtenemos esquemas de diseño que no logramos entender y que generarán resultados, como mucho, mejorables.

FIGURA 007

El afán del diseñador por la novedad de los materiales o técnicas puede resultar en diseños no funcionales y alejados de las necesidades del proyecto.

FIGURA 008 Exploración frente a explotación

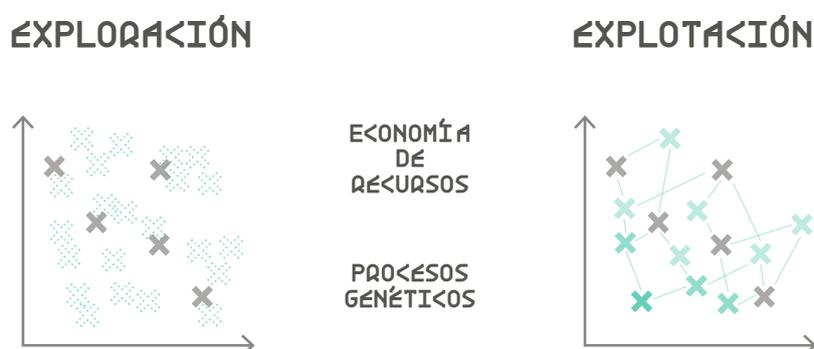


FIGURA 008

Mientras mayor sea el tamaño de la población y el número de generaciones, mayor será el área del espacio de diseño que se podrá estudiar y, de igual manera, mayor la explotación de cada individuo, respectivamente

También existe un dilema de **explotación frente a exploración** dentro del proceso de optimización de un modelo. Tras generar

una primera **población**, en términos genéticos, de iteraciones del esquema de diseño y medir su desempeño, emerge la cuestión de hacia dónde dirigir los recursos para continuar con la búsqueda del mejor rendimiento posible (Figura 008). Por un lado podemos **explotar** los mejores candidatos para obtener de ellos sus mejores valores, técnica equivalente a **selección** y **cruce**; y por el otro, podemos seguir explorando otras iteraciones que potencialmente tengan un techo de rendimiento más alto, lo que simula el proceso genético **mutación**. Esto es parte del trabajo que realiza el algoritmo evolutivo para administrar sus recursos en la búsqueda de las soluciones con mejor rendimiento dentro del **espacio de diseño**.

La construcción y validación de los sistemas generativos se convierte en una de las principales tareas del proceso de diseño, ya que gobiernan implícitamente la resolución de la exploración de la forma y, en consecuencia, el origen de los resultados alternativos. (Fasoulaki, 2008, p. 10)

Además Makki, Showkatbakhsh y Song (2019) insisten en que un esquema de diseño bien formulado tiene un impacto fundamental en una simulación exitosa, por lo tanto “el modelo genético debe ser robusto y mantener su lógica geométrica mientras es sometido a variaciones aleatorias significativas e impredecibles durante las etapas generativas del diseño” (Krish, 2010).

Espacio de diseño Se considera que el esquema contiene un espacio de diseño acertado cuando, durante el proceso de parametrización se atiende a, principalmente, estas dos relaciones de conceptos: **sesgo frente a varianza**; y **complejidad frente a continuidad**.

Los primeros conceptos aluden a la amplitud del espacio de diseño. Nagy (2017) explica que un modelo con **sesgo** alto está demasiado inclinado a producir un resultado concreto debido a que el espacio de diseño no es lo suficientemente extenso. En cambio, si un modelo presenta **varianza** alta, su espacio de diseño es demasiado flexible y por tanto su exploración es improductiva y no garantiza encontrar iteraciones óptimas (Figura 009).

Además, el equilibrio de la complejidad frente a la continuidad examina la estructura del espacio de diseño y la predictibilidad de sus resultados. Por un lado, mientras mayor la **complejidad**, mayor el potencial del esquema para producir resultados imprevisibles (Figura 010); “un espacio con poca complejidad no suele merecer el esfuerzo del proceso del diseño generativo, ya que podemos intuir el mejor diseño” (Nagy, 2017). Por el otro, la **continuidad** hace referencia a la similitud entre dos iteraciones que se encuentren cerca dentro del espacio de diseño; esto beneficia al AG ya que le permite predecir

en cierta medida el rendimiento de los diseños adyacentes. Si el espacio de diseño es discontinuo, el algoritmo no podrá hacer más que transitar entre muestras aleatorias sin la capacidad de **aprender** sobre el espacio de diseño. Nagy (2017) también comenta que cierto grado de discontinuidad es tolerable por un AG y produce cierto

FIGURA 009 Sesgo frente a varianza

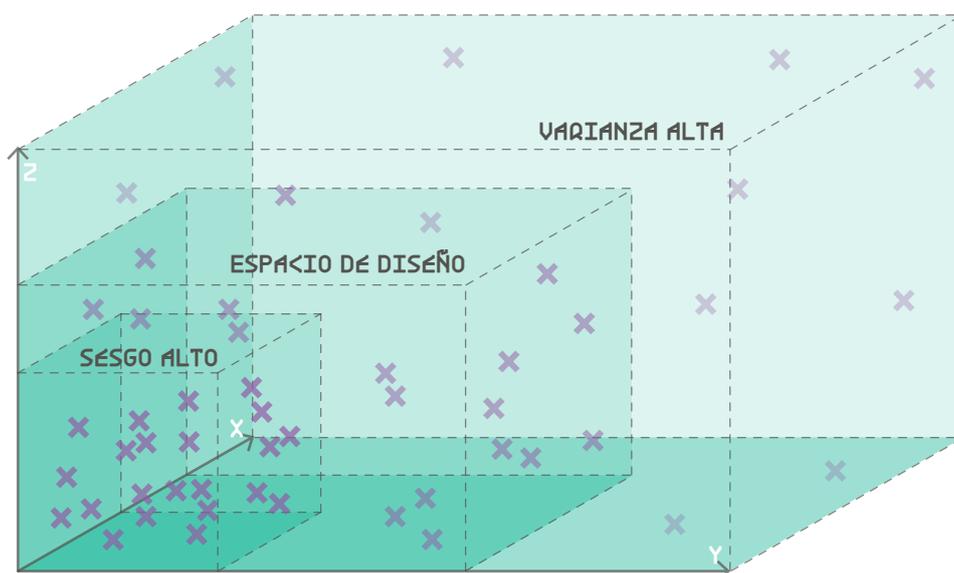


FIGURA 009
Cada problema de diseño requiere un adecuado nivel de varianza que permita encontrar resultados válidos en un tiempo razonable.

FIGURA 010 Complejidad frente a continuidad

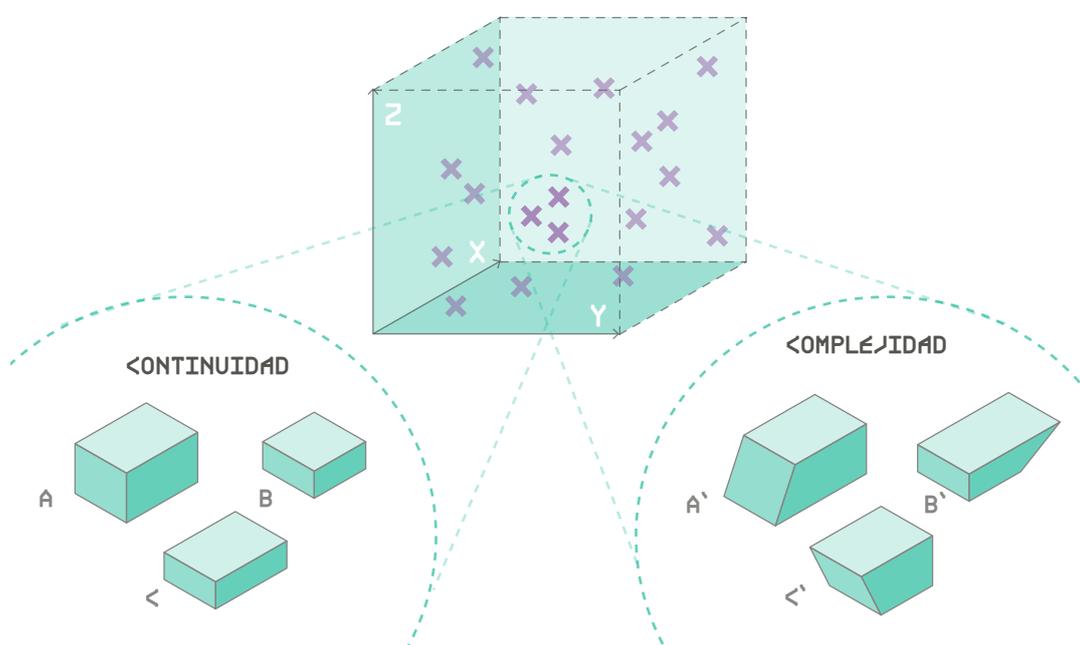


FIGURA 010

Un espacio de diseño con complejidad suficiente permite explorar más soluciones de las que podríamos simplemente intuir.

grado beneficioso de complejidad en el espacio de diseño. Debido a la naturaleza abstracta de estos conceptos, no existe una guía que determine claramente cómo seguirlos o aplicarlos; es tarea del diseñador el comprender su funcionamiento y encontrar un equilibrio que sea favorable para el proyecto.

El espacio de diseño también se ve afectado por el tipo de **control** que ejercen los parámetros sobre las soluciones y la estructura del esquema de diseño. Nagy (2017) define cuatro tipos de **estrategias de control**: morfológicas, cambio-de-estado, recursivas y de comportamiento; en el proyecto utilizaremos las dos primeras ya que nos proporcionan el nivel de control necesario para el tipo de trabajo que estamos realizando (Figura 011). Además, su aplicación no requiere de conocimiento sobre programación en lenguajes como **Python** o **C#**; el control que ejercen estas dos estrategias es del tipo **directo**:

01. Morfológicas.

Se refieren al ingreso de datos con medidas continuas (números reales) para controlar, por ejemplo, dimensiones o número de geometrías.

02. Cambio-de-estado.

Esta estrategia proporciona un control sobre un tipo o clase de elementos a utilizar y utilizan números enteros para definir estas opciones; por ejemplo, diferentes tipos de secciones para vigas o de dimensiones para ladrillos.

FIGURA 011 Estrategias de control directas

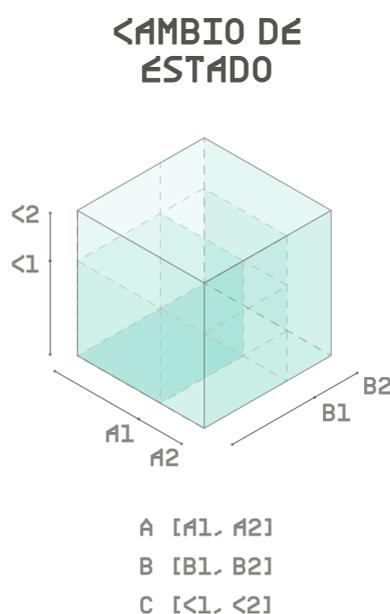
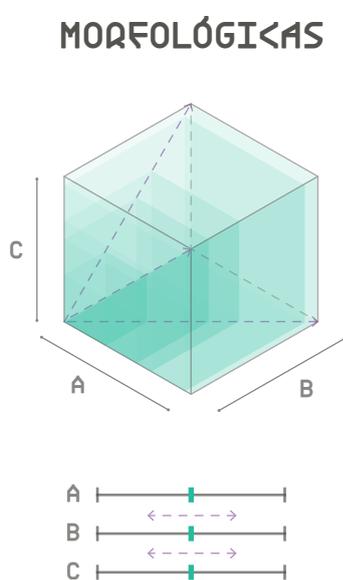


FIGURA 011

Aunque las estrategias de control del tipo directo no posibiliten fácilmente una exploración formal amplia, crean la complejidad suficiente para el tipo de problema de diseño con el que estamos trabajando.

Estructura del esquema

Los nodos que componen el **código** del proyecto se pueden organizar en los siguientes grupos de acuerdo con su orden de participación y propósito dentro de la totalidad del esquema:

01. Datos de entrada.

Consiste en toda aquella información relevante que ejerce de primer eslabón de la actividad del resto de nodos; son, generalmente, variables para controlar el comportamiento del esquema, además de la información pertinente al contexto o valores constantes predefinidos.

02. Composición de forma.

Son todas las operaciones que toman la información inicial para producir elementos geométricos como líneas y planos que configuran no sólo el espacio arquitectónico si no también la geometría auxiliar que asiste en otros procesos. Es oportuno agrupar las operaciones de geometría que no influyen directamente en los objetivos de diseño de forma que se puedan deshabilitar y así reducir la carga computacional al momento de ejecutar el AG.

03. Objetivos de diseño.

Esta sección incluye todas las operaciones entre geometría, medidas y variables que son necesarias para calcular los valores de aptitud de cada objetivo de diseño o restricción que se busca optimizar.

04. Algoritmo genético y análisis.

Wallacei, como motor evolucionario y analítico, además del componente que ejecuta el algoritmo genético (**Wallacei X**) también incluye un conjunto de componentes para analizar los resultados producidos por la simulación evolutiva (**Wallacei Analytics**). Estas herramientas de análisis nos permiten estudiar el comportamiento de los valores de aptitud de toda la población a través de las generaciones, examinar las tendencias que manifiesta el proceso evolutivo y, en consecuencia, tomar una decisión mejor fundamentada.

Asimismo, esta estructura puede ser tomada como una referencia de un flujo de trabajo **simplificado** (Figura 012) para la aplicación del método de diseño computacional generativo aunque la plasticidad inherente a éste permita un acercamiento desde varias direcciones, en secuencia o paralelamente.

FIGURA 012 Bosquejo de la estructura del esquema

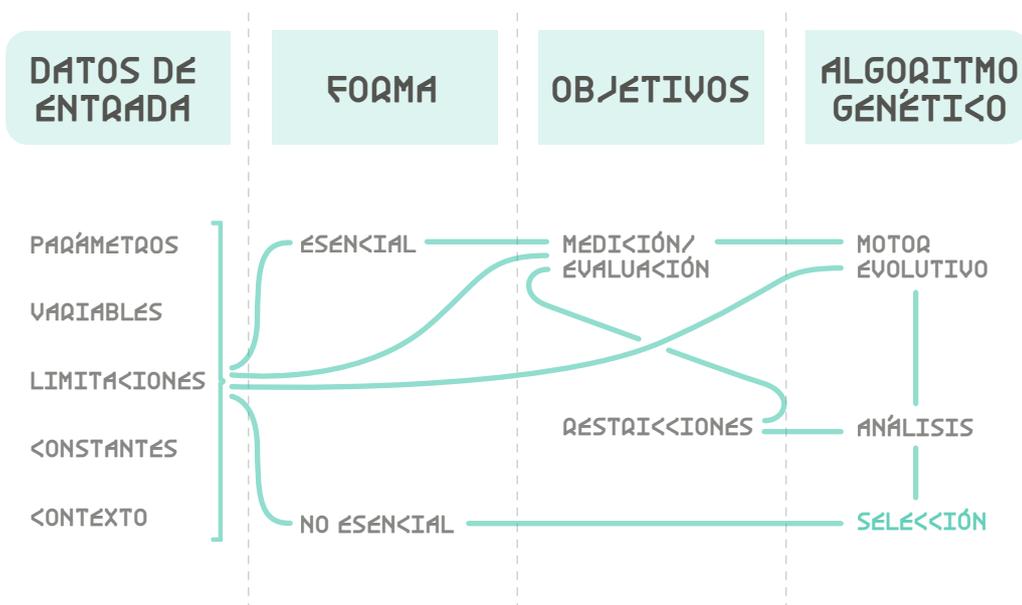


FIGURA 012 El diseño computacional generativo puede entenderse como un proceso de prueba y error en el que el AG modifica los valores que toman las variables del esquema hasta encontrar las combinaciones de valores con un mejor desempeño en los objetivos de optimización determinados.

Medidas de diseño Debido a la falta de *intuición* del AG, los objetivos de diseño son la única forma a través de la cual podemos indicarle lo que buscamos lograr con la simulación; por lo tanto, el éxito de la aplicación del diseño generativo radica en: primero, la robustez de la codificación del esquema de diseño y, segundo e indispensable, que los objetivos de diseño puedan ser expresados como una medida numérica. Dicho esto, ¿qué se puede medir y qué no dentro de un proyecto arquitectónico? Nagy (2017) explica una clara división:

01. Medibles sencillos.

Características que son fácilmente medibles o intuibles y no requieren mucha explicación como superficies, alturas, volúmenes, etc.

02. Medibles complejos.

Propiedades que son difíciles de intuir pero teóricamente calculables aunque requieren cierto poder de computación para determinar sus valores, por ejemplo: simulaciones estructurales, dinámica de fluidos, flujo de personas, etc.

03. No medibles.

Dentro de esta categoría recaen los gustos personales y otras características subjetivas como belleza o estilo.

Los objetivos de diseño deben comprender todo lo importante del modelo que recaiga dentro de las dos primeras categorías ya que actualmente no existen métodos para entrenar a un algoritmo en características sujetas a juicios subjetivos (Nagy, 2017). Además, al no haber reglas estrictas sobre qué medidas debe elegir el diseñador ni cómo deben aplicarse, la formulación de los problemas de diseño representan una tarea de igual importancia y complejidad que la parametrización del espacio de diseño.

Fasoulaki (2008, p. 19) afirma que la mayoría de los problemas de diseño de arquitectura, como la mayoría de los problemas del mundo real, son de naturaleza multi-objetivo; pero aunque existen procedimientos para transformar un problema multi-objetivo en un problema de optimización escalar, como el método de la suma ponderada, no serán utilizados en este estudio ya que involucran la subjetividad del juicio del diseñador. Estos métodos pueden ser utilizados en combinación con algoritmos genéticos, lo que se conoce como MOEA (**Multi-Objective Evolutionary Algorithms**, en español

algoritmos evolutivos multiobjetivo). Sin embargo, el motor evolucionario **Wallacei** no contiene este factor de subjetividad ya que permite examinar las mejores iteraciones por cada objetivo sin unificar los resultados, además de otros métodos de análisis.

Objetivos de diseño Fasoulaki (2007) explica que los objetivos de diseño están conformados por tres componentes básicos (Figura 013):

01. Función objetivo.

Propiedad, relación o simulación del modelo expresado en un valor numérico que se busca maximizar o minimizar como problema de optimización. El motor evolucionario que utilizaremos, **Wallacei**, únicamente trabaja minimizando los valores de optimización, por lo tanto, para los casos de objetivos que busquemos maximizar debemos utilizar la fracción inversa del valor original ($1/x$).

02. Variables designadas.

Cada función objetivo se ve modificada su rendimiento de acuerdo con la influencia de uno o más **parámetros** del esquema, los cuales ahora consideraremos como **variables**; de esta manera, el algoritmo genético se verá autorizado a permutar los valores de estas variables, dentro de unos límites determinados, para buscar las combinaciones de valores que produzca mejores rendimientos para cada objetivo. Según Nagy (2017), tenemos tres tipos de parámetros de entrada:

a. Valores discretos.

Son representados por números enteros y definen un conjunto de categorías u opciones.

b. Valores continuos.

Son representados por números reales y definen medidas.

c. Secuencias de permutación.

Definen el orden de un número fijo de elementos.

Dentro de **Wallacei** no es necesario definir qué tipo de parámetro corresponde a cada variable, pero es parte de la formulación de los ob-

FIGURA 013 Diagrama simplificado de un objetivo de optimización

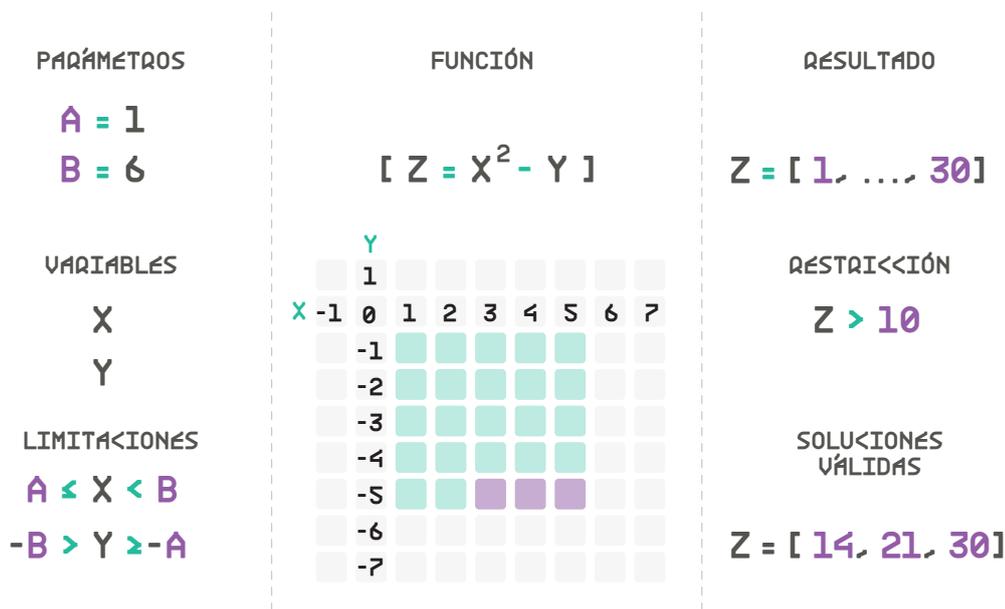


FIGURA 013 Unos objetivos de diseño definidos con precisión se traducen en una exploración del espacio de diseño más rentable y con una mayor probabilidad de encontrar diseños óptimos satisfactorios.

jetivos. Las variables se ven representadas por controladores deslizantes individuales o múltiples (acervo genético o **gene pool** en inglés) con el afán de simplificar la cantidad de parámetros de entrada para sistemas más complejos.

03. Limitaciones.

“Las limitaciones actúan como límites del espacio de diseño y suelen producirse debido a la finitud de los recursos o a las limitaciones tecnológicas de algunas variables de diseño” (Fasoulaki, 2008, p. 18). Generalmente, el diseñador establece ciertas restricciones de forma tentativa y durante el proceso de configuración del esquema de diseño se redefinen con mayor precisión.

Manejo de restricciones

Otra consideración dentro de los problemas de diseño multi-objetivo es el manejo de las restricciones; éstas representan un criterio definido por el diseñador para determinar si un diseño es factible o no, independientemente de su rendimiento en los objetivos de diseño (Figura 014). Generalmente, ciertas características de un proyecto arquitectónico están sujetas a restricciones como dimensiones, cantidades de elementos o resultados de simulaciones. Las restricciones pueden necesitar pertenecer a un rango o ser inferior, superior o igual que un valor determinado y no siempre están sujetas a una unidad. Nagy (2017) explica tres enfoques para tratar las restricciones:

01. Descalificación inmediata.

Consiste en **eliminar** de la población a los individuos que no cumplan con las restricciones. Este método puede resultar en una pérdida de información potencialmente valiosa ya que se descarta totalmente la información **genética** de las iteraciones rechazadas. Dentro de **Wallacei** existe un mecanismo para reemplazar los valores **nulos** por otros para completar el número de individuos de una población, lo que puede utilizarse para esta estrategia de **descalificación inmediata** pero provocará que el tiempo necesitado para la simulación sea mucho mayor debido a la cantidad de individuos que tendrá que considerar.

02. Descuento en función de viabilidad.

Consiste en disminuir la probabilidad de un individuo para **reproducirse** en función de su viabilidad; la penalización será mayor mientras más generaciones transcurran. Esta estrategia no es factible debido al AG que estamos utilizando; además, el valor de penalización puede ser difícil de precisar.

03. Viabilidad como objetivo de optimización.

Esta es la estrategia que utilizaremos ya que consiste en tratar la **viabilidad** de cada individuo como un objetivo de optimización que el AG tratará de minimizar de la misma manera que a los objetivos de diseño.

Dicho esto, cabe aclarar que las restricciones deben expresarse como índices susceptibles a optimización; en otras palabras, el objetivo de diseño debe tener la capacidad de manifestar un rango de valores que permitan al

FIGURA 014 Restricción como objetivo de optimización

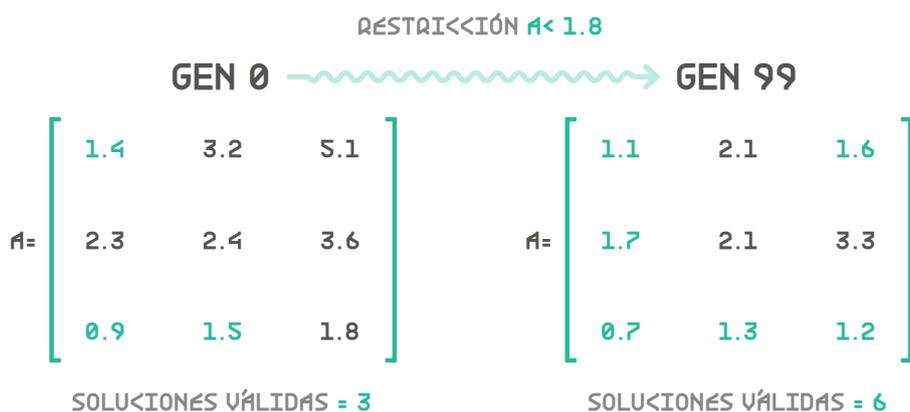


FIGURA 014

Al considerar la viabilidad como un objetivo de diseño, maximizamos el número de soluciones factibles en la última generación dado que los individuos adquieren un indicador de aptitud para progresar hasta entrar en el conjunto elegible aunque su condición inicial hubiera provocado una descalificación ipso facto.

AG explorar y aprender cómo mejorar, ya que en caso de formular una restricción con un tipo de dato **booleano** (solo representa dos valores: **1**, verdadero; o **0**, falso) únicamente posibilitamos al AG discernir cuál de las dos es la preferible, sin la capacidad de **inferir** cómo ajustar las variables en pro del cumplimiento de la restricción. Además, este tipo de incongruencia entre los valores que los objetivos son capaces de expresar puede provocar un desequilibrio en el proceso de búsqueda de las soluciones óptimas debido a que todos los objetivos de optimización poseen el mismo peso o importancia.

Por último, debido a que **Wallacei** provee la posibilidad de anexar información por cada individuo a manera de **propiedades** (sin que estos influyan en la ejecución del AG), podemos plantear un atributo a modo de un factor que nos permita excluir a los individuos que no cumplan el estándar propuesto.

Algoritmo genético Los algoritmos genéticos (AG) toman inspiración de la evolución biológica y los procesos de la naturaleza para la búsqueda de soluciones a un problema, en este caso de diseño. Al continuar con la jerga de la rama de la biología, el esquema de diseño toma el nombre de **genotipo**, mientras que cada iteración es un **fenotipo**. Además, técnicamente, estos algoritmos de **optimización** se basan en principios **estocásticos** (no determinista) y se denominan **metaheurísticos** (meta corresponde a que su aplicación es generalizable).

La estrategia general de estos métodos consiste en empezar a muestrear uno o varios diseños al azar y, a continuación, utilizar los conocimientos derivados de esos diseños para muestrear otros, con la esperanza de que sean aún mejores. Siguiendo este proceso de forma iterativa, el algoritmo puede localizar eficazmente los mejores diseños sin saber nada sobre cómo funciona el espacio de diseño y sin tener que muestrear todos los diseños posibles. (Nagy, 2017)

Fasoulaki (2007) comenta que, en el campo de la arquitectura, los AG son utilizados de dos maneras: como herramientas de optimización y como herramientas de generación de formas. En el primer caso se ocupan de problemas claramente definidos como, por ejemplo, estructurales, térmicos, etc.; mientras que en el segundo caso, se ocupan de generar formas novedosas,

aunque muchas veces sin servir a ningún requerimiento funcional o estructural. En este mismo artículo, concluye que es necesaria mayor investigación en la aplicación de la **optimización de diseño multidisciplinar** (multidisciplinary design optimization, MDO) en el campo de la arquitectura; método que, como su nombre indica, consiste en la coordinación de varias disciplinas distintas para generar soluciones integrales y que ya se usa en otras industrias como la automovilística, aeroespacial y electrónica. Las ventajas que ya ofrece el método BIM (**Building Information Modelling**) en cuanto a transferencia de información, entre diseño y cálculo, alcanza una nueva dimensión al involucrar las simulaciones dentro del esquema de diseño, además de optimizar el tiempo que representa la comunicación entre estas partes.

Los procesos de descripción y construcción de un diseño pueden ser ahora más directos y más complejos porque la información puede extraerse, intercambiarse y utilizarse con mucha más facilidad y rapidez; tal que, con el uso de las tecnologías digitales la información del diseño es la información de la construcción. (Kolarevic, 2003, p.10)

Goldberg (1989) explica que el funcionamiento de este sistema es **sorprendentemente sencillo** y eficaz; consta de cuatro operadores básicos que a excepción del primero, se repiten en cada **generación**, hasta alcanzar un número determinado de generaciones (Figura 015):

01. Generación.

El proceso comienza con una primera población que, por lo común, es generada a través de números **aleatorios**.

Por lo general, la población inicial debe ser lo suficientemente grande como para permitir que se incluya una gran cantidad de información genética en el proceso. Sin embargo, las implicaciones de utilizar poblaciones grandes son tanto la gran inercia en la progresión de la búsqueda como el elevado tiempo de cálculo. (Fasoulaki, 2008, p. 20)

02. Selección.

En este paso, los fenotipos con una mayor aptitud (mejores valores en sus objetivos de optimización) obtienen una mayor **probabilidad** de ser seleccionados para transferir parte de sus **genes** a la población de la siguiente generación.

FIGURA 015 Diagrama del funcionamiento de un algoritmo genético

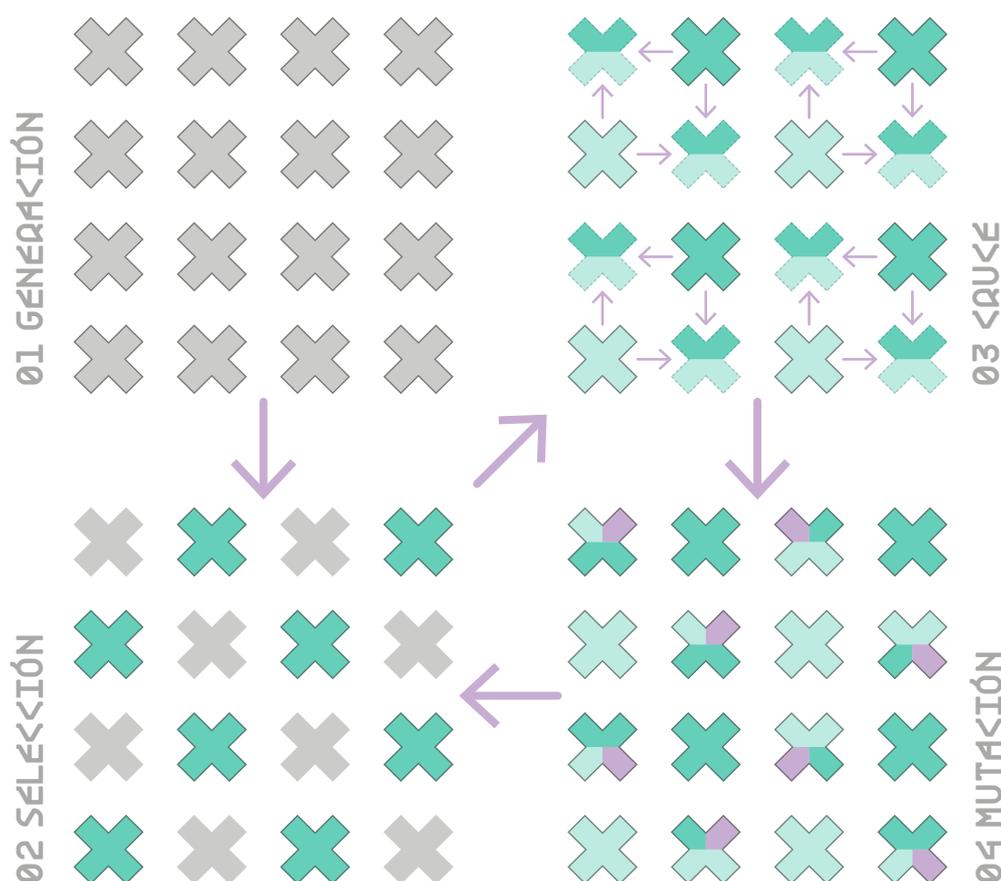


FIGURA 015

El algoritmo genético selecciona a los individuos más aptos de acuerdo con su rendimiento y los somete a procedimientos similares a los que actúan en la evolución biológica.

03. Cruce.

El propósito de este proceso es combinar una pareja de **padres** de entre esta selección preliminar debido a que al haber logrado **sobrevivir** a dicha selección, deben tener algún material genético que pueda ser útil para la siguiente generación. La forma en la que se realiza el cruce depende del AG que utilizemos, que en este caso es el algoritmo **NSGA-2**, propuesto por Deb, *et al.* en 2001.

04. Mutación.

La selección y el cruce pueden no ser suficientes para alcanzar una solución óptima, ya que si ciertas características no se introdujeron al sistema en la primera generación existirá una potencial pérdida de información valiosa. Para mitigar este inconveniente, el proceso de mutación transforma aleatoriamente las variables en un pequeño porcentaje, predeterminado por el AG, antes de conformar la siguiente generación.

Dicho esto, es evidente que existe un factor de azar dentro de este sistema, por ejemplo en la selección de la **población** inicial y en cómo mutan las iteraciones al generar variedad; por lo tanto, “no está garantizado que encontremos los mismos resultados cada vez que ejecutamos el algoritmo, ni tampoco que encontremos la mejor solución **absoluta**” (Nagy, 2017). Aún así este tipo de algoritmos de búsqueda son los más aptos para trabajar en el diseño generativo ya que no necesitan conocer el funcionamiento interno del modelo o de los objetivos que definamos.

Por último, la ejecución del AG puede acompañar todo el proceso de diseño como método de comprobación del esquema, estudio de los objetivos de diseño, refinamiento de las restricciones y ajuste de las limitaciones de las variables; pero, debido a la cantidad de recursos que tomaría esta evaluación en todo el proceso, es recomendable que solo una vez que el AG reporte una cantidad **suficiente** de resultados viables (individuos del frente de Pareto que atraviesan los filtros de restricciones) y sin errores, consideremos la ejecución del AG con una población y número de generaciones conveniente para establecer el conjunto de soluciones sobre el que se realizará el análisis y la selección final.

Soluciones óptimas Dado que estamos trabajando con varios objetivos de diseño no existe una única solución **óptima y global** ya que el mejor rendimiento en un objetivo no asegura que la iteración se desempeñe de igual manera en el resto debido a la influencia que tienen unos objetivos en el rendimiento de los otros; “en pocas palabras, el diseño implica casi siempre compromisos y no hay casi soluciones óptimas que satisfagan simultáneamente todos los requisitos del edificio” (Fasoulaki, 2008, p. 41).

De entre los métodos que incluye el motor generativo **Wallacei** para el análisis de resultados tenemos al **frente de Pareto**; que es un término económico que se ha interpolado a otros campos y sostiene que **una solución es óptima cuando no existe otra solución tal que mejore en un objetivo sin empeorar al menos uno de los otros** (Figura 016); entonces, se define una nube de soluciones dentro de este teórico espacio de diseño multi-dimensional con

individuos **óptimos** que no son **dominados** por otras iteraciones. “Cualquiera de los puntos de Pareto puede ser una solución potencialmente **buena**; la definición de **buena** se basa en el juicio de cada diseñador sobre la importancia relativa de las prestaciones” (Fasoulaki, 2008, p. 42). Por lo tanto, una vez seleccionado un conjunto de potenciales soluciones, queda en manos del diseñador hacer un juicio sobre qué propuesta es la más adecuada para continuar con el diseño; o en un enfoque más participativo, presentar las posibilidades con sus pros y contras a los actores no-diseñadores del proceso creativo.

Además, el producto final del enfoque propuesto no es un solo edificio. En realidad, ni siquiera es un edificio. Mediante la utilización de este enfoque surgen varias soluciones potenciales de diseño. Se trata de visualizaciones digitales de **ideas** de diseño primitivas que incorporan un nivel superior de inteligencia que combina tanto la eficiencia como la exploración de la forma. Sin embargo, deben utilizarse como base para una mayor investigación y elaboración en los siguientes pasos del proceso de diseño. (Fasoulaki, 2008, p. 30)

FIGURA 016 Frente de Pareto aplicado al diseño

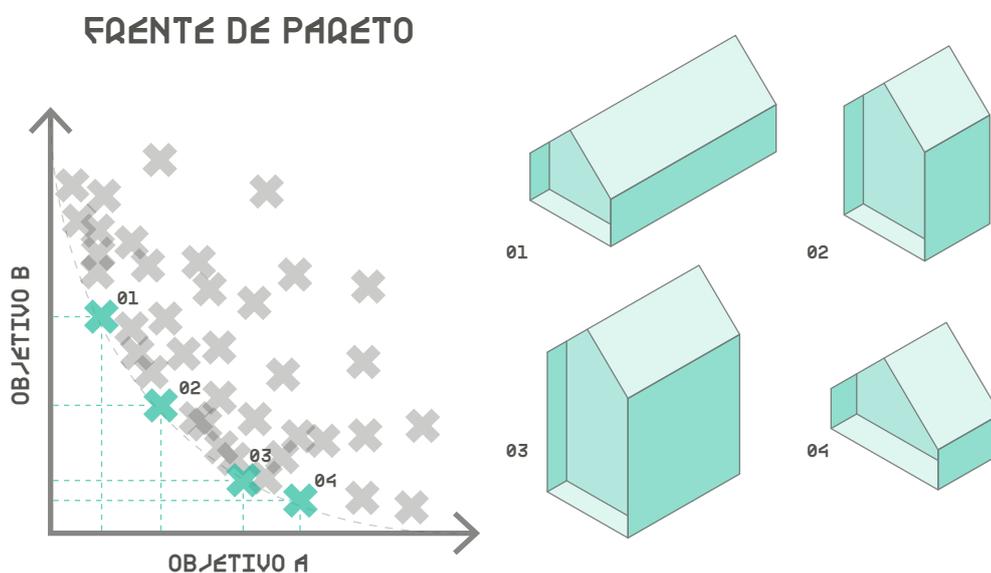


FIGURA 016
A lo largo de la línea que esbozan los individuos del frente de Pareto encontramos soluciones que resuelven el problema de diseño de distintas formas pero que son análogamente óptimas.

Caso de estudio Como caso de estudio se tomó de referencia el trabajo realizado por la **Architectural Association School of Architecture** como parte de su programa de cursos y talleres, **Visiting School**, en Osaka, Japón. El objetivo del taller fue diseñar una pagoda tradicional japonesa mediante herramientas digitales avanzadas, entre ellas **Wallacei**, para generar variaciones de diseño y optimizar diferentes objetivos de aptitud. El taller se dividió en varios grupos que presentarían, cada uno, un enfoque distinto de la pagoda con el uso de herramientas digitales, de entre las cuales se seleccionaría uno para continuar el desarrollo y pulir la propuesta. Dado el contexto de gran tradición japonés, el taller busca aliviar la brecha entre la artesanía de los métodos de construcción tradicionales y las técnicas de fabricación digital de vanguardia. Dicho esto, se estableció que el único material utilizado sería la madera, sin la fijación adicional de otros elementos como clavos, tornillos o pernos; de esta manera, se garantiza el uso atento e intrincado de las juntas: elemento emblema en la arquitectura tradicional japonesa.

El objetivo del análisis de este estudio de caso no es examinar el código del esquema de diseño debido a que, primeramente, los archivos no son compartidos ya que suponen gran parte del trabajo realizado, además, la instrucción en el uso de **Grasshopper** ya se trata en la facultad y puede ser complementado con autoaprendizaje; y por último, la finalidad de este trabajo de titulación no es ser un tutorial **per se** de diseño computacional. Entonces, el motivo de este análisis es investigar las posibilidades del diseño computacional aplicado a un problema de optimización de formas complejas y rendimientos interrelacionados, reconocer el flujo de trabajo utilizado y analizar los componentes que puedan ser extrapolados al proyecto.

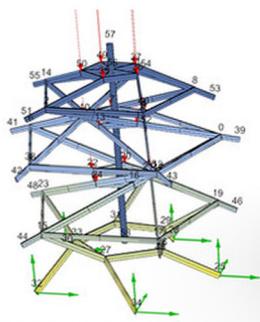
El diseño inicial de las propuestas es trabajado **tradicionalmente**, si lo podemos llamar así, a través de bocetos, diagramas y maquetas, de la misma forma en la que trabajamos en la facultad actualmente, pero ahora también se toma en consideración que el modelo digital necesita ser **parametrizado**; es decir, su expresión debe poder cambiar de acuerdo a los valores de las variables establecidas, dentro de unos límites fijados. Cabe mencionar que algunas propuestas decidieron incorporar el uso del algoritmo genético en esta etapa de exploración de forma, tomando como objetivos de diseño la complejidad y cantidad de juntas, por ejemplo. Los autores del artículo, que fueron varios de los tutores en el taller, explican el diseño escogido para su fabricación (Figura 017) de la siguiente forma:

El esquema seleccionado era una estructura de pagoda de 3 niveles compuesta por una base pentagonal recíproca a través de la cual cada nivel retrocede hacia el interior (una característica que se encuentra en las pagodas japonesas tradicionales). El límite de la estructura se situaba dentro de una caja delimitadora de 3 m x 3 m x 4 m, en la que el marco estructural -compuesto por columnas, vigas y anillos de tensión/compresión- soportaba las lamas lineales del techo situadas en cada uno de los tres niveles de la pagoda. (Makki, Matsuoka, Ilic, Franceschini y Beneitez, 2020)

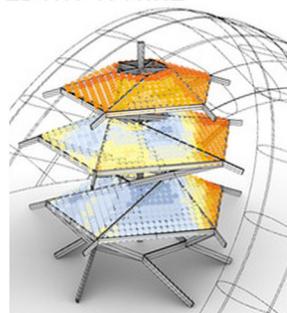
FIGURA 017 Proyecto desarrollado en Visiting School Osaka



MODELO DIGITAL



ESTRUCTURAL



SOLEAMIENTO



PROYECTO CONSTRUIDO

Al analizar el esquema que considera el AG, notamos que este modelo **flexible** contiene las relaciones esenciales de elementos sin detallar las juntas o incluir elementos que no se consideren influyentes para los objetivos de optimización que serán propuestos, como por ejemplo el entramado de los faldones. Esto se debe a varias razones: primero, en la etapa inicial del diseño difícilmente están ya definidos los detalles; segundo, en caso de estarlo, la codificación de las instrucciones para producir los ensambles requiere de una importante cantidad de tiempo.

FIGURA 017
Architectural Association
School of Architecture (2009)
Proyecto desarrollado en el
programa Visiting School,
Osaka, Japón.

po y conocimiento del software de trabajo; y, por último, mientras mas complejo sea el modelo con el que trabaja el algoritmo, el tiempo necesario para el proceso de búsqueda de soluciones crecerá exponencialmente. Lo ideal es representar el modelo lo más simple posible, aunque de esta manera sea más complicado de comprender e interpretar; ventajosamente, **Wallacei** permite que ciertos elementos, como las extrusiones de los miembros o geometrías que no son imprescindibles, sean computados posterior al cálculo propio del AG y de esta forma aliviar la carga de procesamiento sin menguar la comprensibilidad de la representación gráfica de las posibles soluciones.

Si comparamos las uniones de la estructura en esta etapa con las del modelo construido podemos observar que existe un proceso de simplificación en cuanto a cantidad de direcciones de los elementos que convergen en una junta: se pasa de un máximo de cuatro direcciones distintas hasta un máximo de tres (Figura 018). En vez de considerar la estructura como si se tratase de un domo geodésico y unir los miembros a través de conectores universales, se realiza un tratamiento de las piezas en un orden específico de acuerdo a los tipos de elementos como vigas, columnas, cabios, etc. Por ejemplo, en una de las juntas de los anillos exteriores, dos de estos elementos se unen para conformar un solo cuerpo a forma de viga de cierre y luego éste intersecta al elemento restante, que toma la función de columna inclinada y cabio de limatesa. Además, este elemento se desplaza de modo que el punto de apoyo superior no coincida con el anillo exterior. Estas estrategias de simplificación ayudan a no solo aliviar la complejidad de las uniones (a costa del número total de puntos de intersección), sino también proponen un orden para las **operaciones booleanas** que han de realizarse digitalmente.

FIGURA 018 Análisis de uniones del caso de estudio



Como se muestra en la Tabla 001 (Architectural Association Architecture School), la selección de los objetivos de diseño, en este caso únicamente tres, se debe a consideraciones puramente de optimización.

FIGURA 018 Análisis de las diferencias entre el modelo digital y la propuesta construida.

TABLA 001 Criterios de aptitud del caso de estudio

Criterios de aptitud	Genes			
	ancho de los anillos internos	alto de los anillos internos	ancho de los anillos externos	alto de los anillos externos
minimizar deflexiones	✓	✓	✓	✓
maximizar volumen	✓	×	✓	×
minimizar peso	✓	×	✓	×

TABLA 001
Variables del modelo y los objetivos de diseño (únicamente de optimización) en los que influyen.

No existe una exploración formal en los objetivos, por lo tanto, las variables seleccionadas para permutar sus valores no reflejan cambios sustanciales en la percepción de la forma.

De esta selección de objetivos se puede señalar que los dos primeros pueden trabajar a la par sin interferir en sus intereses ya que, por ejemplo, mientras menor sea el volumen de la estructura, menor su peso y por lo tanto, mayor el rendimiento en ambos objetivos. Ahora, para crear oposición, entra en juego el tercer objetivo de diseño que busca maximizar el volumen que comprende la propuesta. Por lo tanto, estas fuerzas ahora ya en debate, pueden ser de interés para el uso del algoritmo de búsqueda. Dado que no existe un fenotipo que perfeccione cada objetivo de diseño, el AG busca un equilibrio en el que la mejora de un objetivo no represente el detrimento total de los restantes; es decir, cuánto puede ceder un objetivo en favor del interés promedio.

Los autores concluyen el artículo mencionando ciertas inexactitudes del proyecto construido: por una parte, la complejidad de las juntas de conexión, así como la posición y orientación de los elementos de madera impidieron que las juntas aseguraran una conexión perfectamente ajustada y firme; y por otra parte, los cortes láser realizados a ciertos elementos no aseguraron una superficie de contacto completa en su encuentro con otros elementos de distinta inclinación debido a que el ángulo de corte es únicamente perpendicular. Como resultado de este análisis, deberemos tomar en cuenta ciertos aspectos:

- 01.** Valorar si la complejidad del modelo para el GA es la adecuada.
- 02.** Atender a las dimensiones reales de los materiales y las limitaciones de los métodos de fabricación.
- 03.** Verificar las uniones y definir cómo éstas serán ensambladas.

Referencias

- Alexander, C. (1980). *Tres Aspectos de Matemática y Diseño: La estructura del medio ambiente* (Beatriz de Moura, Trad.) (2da ed.). Tusquets Editores.
- Schumacher, P. (14 de septiembre-23 de noviembre de 2008). *Parametricism as Style – Parametricist Manifesto*. 11º Bienal de Arquitectura de Venecia, Italia.
- Kolarevic, B. (Ed.). (2003). *Architecture in the Digital Age. Design and Manufacturing*. Spon Press.
- Frazer, J. (1995). *An Evolutionary Architecture*. Architectural Association Press.
- Frazer, J., Janssen, P. (2003). Generative and Evolutionary Models for Design. *Communication & Cognition* (36), 187-215.
- Krish, S. (2010). A practical generative design method. *Computer-Aided Design* (43), 88-100.
- Goldberg, D. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley.
- Makki, M., Showkatbakhsh, M., Song, Y. (2019). *Wallacei Primer 2.0* [Archivo PDF]. Disponible en <https://www.wallacei.com/>.
- Nagy, D. (24 de enero de 2017). *Learning from nature*. Medium. <https://medium.com/generative-design/learning-from-nature-fe5b7290e3de>
- Nagy, D. (24 de enero de 2017). *The design space*. Medium. <https://medium.com/generative-design/step-1-generate-6bf73fb3a004>
- Nagy, D. (24 de enero de 2017). *Designing measures*. Medium. <https://medium.com/generative-design/designing-measures-2c66a71b2ff3>
- Nagy, D. (19 de marzo de 2017). *Design optimization*. Medium. <https://medium.com/generative-design/design-optimization-2ec2ba3b40f7>
- Nagy, D. (26 de enero de 2017). *Evolving design*. Medium. <https://medium.com/generative-design/evolving-design-b0941a17b759>
- Nagy, D. (12 de febrero de 2017). *Control strategies*. <https://medium.com/generative-design/control-strategies-b4cf07b26cda>
- Kocatürk, T., Benachir, M. (Ed.). (2011). Interview with Lars Hesselgren, Director PLP Research. *Distributed Intelligence in Design*, 247-251.
- Fasoulaki, E. (2008). *Integrated Design: A Generative Multi-Performative Design Approach* [Tesis de maestría, Massachusetts Institute of Technology]. Repositorio del MIT. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/43750>
- Fasoulaki, E. (2007). *Genetic Algorithms in Architecture: a Necessity or a Trend?*
- Makki, M., Matsuoka, M., Ilic, A., Franceschini, L., Beneitez, J. (2020). Bridging the Gap Between Traditional Japanese Fabrication and Advanced Digital Tools. *SimAUD 2020*, 557-564.
- Architectural Association School of Architecture. (2019). *Galería del proyecto desarrollado en el programa Visiting School, Osaka, Japón*. [Mixto]. *Wallacei*. <https://www.wallacei.com/aavs-osaka>

Capítulo 003

Desarrollo del esquema

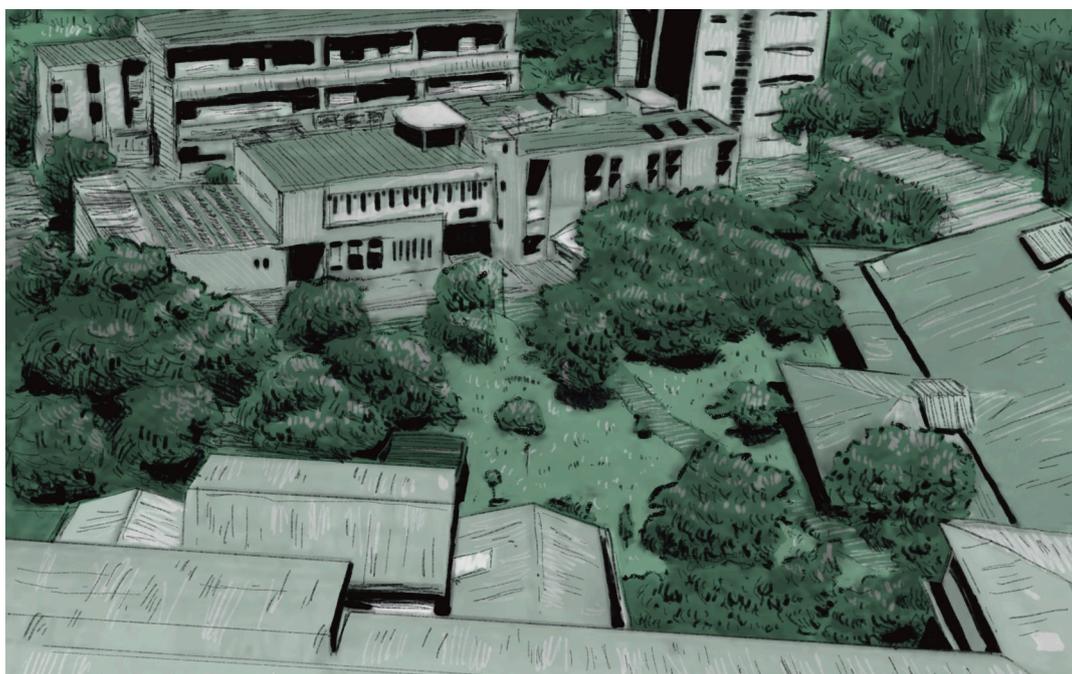
Una vez ilustradas las consideraciones del método de diseño en cuestión, se describirá el trabajo realizado para esta propuesta en específico con respecto a los criterios iniciales, las limitantes del contexto, los objetivos formulados y análisis de resultados de la simulación, sin entrar en los pormenores del manejo y uso del entorno de programación visual.

Limitantes del contexto

Para comprobar la influencia del sitio en el rendimiento y la forma del prototipo de pabellón se consideró un espacio dentro del predio del campus central de la universidad, específicamente comprendido entre las facultades de ingeniería y arquitectura. Este espacio verde provisto de una generosa cantidad de elementos de vegetación es idóneo para comprobar los objetivos de diseño referidos al estudio solar y las restricciones ocasionadas por los elementos existentes (Figura 019).

Entonces, los datos que se necesitó extraer del contexto para el funcionamiento del esquema fueron: primero, las dimensiones del sitio, ya que limitan los valores mínimos y máximos del emplazamiento del pabellón, así como su tamaño; segundo, la ubicación y tamaño de los obstáculos, así como el perímetro del sitio, debido a que representan puntos de referencia que se tratará de evitar para proponer un emplazamiento válido sin colisiones con los elementos existentes; y, por último, las dimensiones de las copas de la vegetación alta, al menos de una forma simplificada, puesto que influyen en el objetivo de diseño concerniente al estudio solar (Figura 020). Cabe mencionar que dado que la topografía del sitio no evidencia una irregularidad considerable, no se formuló un objetivo de diseño que responda directamente

FIGURA 019 Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca



a una relación entre el terreno y la forma del pabellón; sin embargo, se utilizó una malla que presenta una sutil variación de altura en los puntos que la componen para simular un terreno irregular que condicione los apoyos del pabellón. Por lo tanto, las variables que podrá modificar el AG para encontrar un emplazamiento válido

FIGURA 019
Ilustración del sitio considerado para el emplazamiento del proyecto (Universidad de Cuenca).

FIGURA 020 Sitio de emplazamiento



FIGURA 020

Diagrama del sitio, sus dimensiones, elementos preexistentes y limitaciones de las coordenadas de origen.

serán las coordenadas x y y del centro del pabellón, además de otra variable que le permitirá cierta rotación para ajustar su posición sutilmente dado que, aunque la planta del pabellón tome la forma de un polígono regular convexo de n lados, mientras menor es n, mayor es la diferencia del radio y el apotema y por lo tanto más significativa su orientación para evitar obstáculos. Este ejercicio de limitación de las variables es esencial para optimizar los recursos de cálculo y evitar una exploración ineficiente del espacio de diseño.

Consideraciones de materialidad

Debido a su disponibilidad, costo y relativa facilidad de trabajo, se propuso el empleo de madera por encima de otros materiales como el acero. Asimismo, para reducir el uso de maquinaria especializada en la manufactura de los componentes de la estructura se utilizarán piezas de madera aserrada, es decir, se trabajará con elementos de dimensiones ya establecidas por la industria. Por tanto, de entre las piezas mencionadas en la norma NTE INEN 2580:2011 **Sistema de clasificación y calificación de madera aserrada proveniente de bosques húmedos tropicales**, se consideró viable hacer uso de los tipos de piezas indicadas en la Tabla 002, la cual, además, presenta

sus secciones, largos disponibles y tipos de elementos estructurales en los que se ha permitido su utilización. Asimismo, esta restricción en el largo y sección que pueden tomar los elementos estructurales permite representar la estrategia de control del tipo **cambio-de-estado**, debido a que la variable solo puede iterar entre las opciones establecidas para cumplir obligaciones estructurales mientras trata de reducir otros factores como el peso de la estructura. Por lo tanto, además de las dimensiones de su sección, también necesitaremos las longitudes en las que encontramos dichas piezas, ya que estos largos serán especialmente útiles al momento de formular varios objetivos de diseño que nos ayuden a optimizar la materia prima y evitar el uso de juntas longitudinales. La organización de estos elementos lineales para minimizar el desperdicio es conocido como **cutting stock problem** (problema del material de corte, en español), para lo cual emplearemos un algoritmo de ordenamiento que toma las longitudes necesarias y admisibles para reportar la organización de los elementos y el largo de la pieza óptima de donde serán obtenidos con el menor desperdicio de corte.

En cuanto al material y tipo de las uniones, se priorizará el uso de ensamblajes de madera en la mayoría de los miembros de la estructura, con la excepción de los elementos que componen los faldones de la cubierta ya que representan una buena oportunidad para el empleo de soportes metálicos únicos para cada tipo en función de los ángulos verticales y horizontales entre los dos elementos que se busca asegurar. De la misma forma que con las piezas de madera, es posible organizar los soportes metálicos en las planchas de materia prima con el propósito de minimizar el desperdicio; este proceso, ahora en dos dimensiones, en comúnmente conocido como **nesting** (anidación

o nidificación, en español) pero a diferencia del sobrante en madera, este residuo de corte no será considerado como objetivo de diseño debido a que, generalmente, la industria solo calcula los gastos en función del tamaño de las piezas necesarias y

TABLA 002 Secciones de madera utilizadas

Tipos de piezas	espesor [m]	ancho [m]	Largos disponibles [m]							Elementos Estructurales
			2.5	3	4	5	6	7	8	
cuartones	0.25	0.25	x	✓	✓	x	x	x	x	• Columnas
vigas	0.10	0.20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	• Vigas de cubierta • Vigas de suelo • Entramado suelo • Cabios • Armadura/cercha
tablones	0.05	0.20	✓	✓	✓	✓	x	x	x	• Vigas de cubierta • Vigas de suelo • Entramado suelo • Cabios • Armadura/cercha
tablas	0.025	0.20	✓	✓	✓	✓	x	x	x	• Vigas de cubierta • Vigas de suelo • Entramado suelo • Cabios • Armadura/cercha

TABLA 002
Perfiles de madera utilizados, dimensiones y potenciales elementos estructurales.

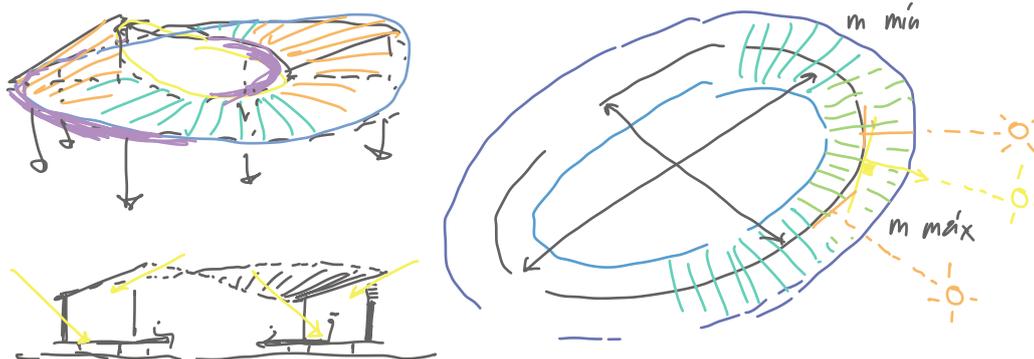
el tiempo de corte. Por último, aunque solo considerado su peso específico como dato práctico, se eligió el barro cocido como material para el recubrimiento de la cubierta; decisión basada únicamente en consideraciones estéticas que, nuevamente, acerquen la expresión del pabellón a un arquetipo familiar con nuestro contexto.

Prototipo de la forma

Inicialmente, el arquetipo fue esbozado como una serie de pórticos que conforman una planta totalmente circular, coronada por una cubierta a modo de cinta (Figura 021); estos dos elementos, la forma de la planta y la cubierta de pendiente variable, fueron los criterios de diseño que se trató de preservar como ejes representativos del proyecto. Asimismo, esto condicionó el planteamiento de la forma y el desarrollo de los objetivos de diseño dado que el propósito de la alteración en la forma de la cubierta es permitir una mayor entrada de luz natural, mientras que la variabilidad de las dimensiones de la planta permite, por ejemplo, hallar un equilibrio entre el volumen contenido por el pabellón y el peso de la estructura, dentro de los límites del sitio y sin intersectar ningún obstáculo.

Esta idea inicial, aún un tanto imprecisa, fue suficiente para empezar a trabajar en la parametrización del modelo, paralelamente junto con los objetivos de diseño debido a que por la naturaleza del método de diseño computacional es posible realizar cambios o correcciones y comprobar los resultados al instante. Por medio de todo este proceso de prueba y error, y tras haber definido la materialidad, compuesto los objetivos y refinado las restricciones, se logró transformar el esbozo inicial en una forma consistente, concreta y consecuente con la elección de los materiales y el sistema constructivo: elementos rectilíneos y superficies planas. Con el propósito de, a través de esta configuración de la forma más cercana a una

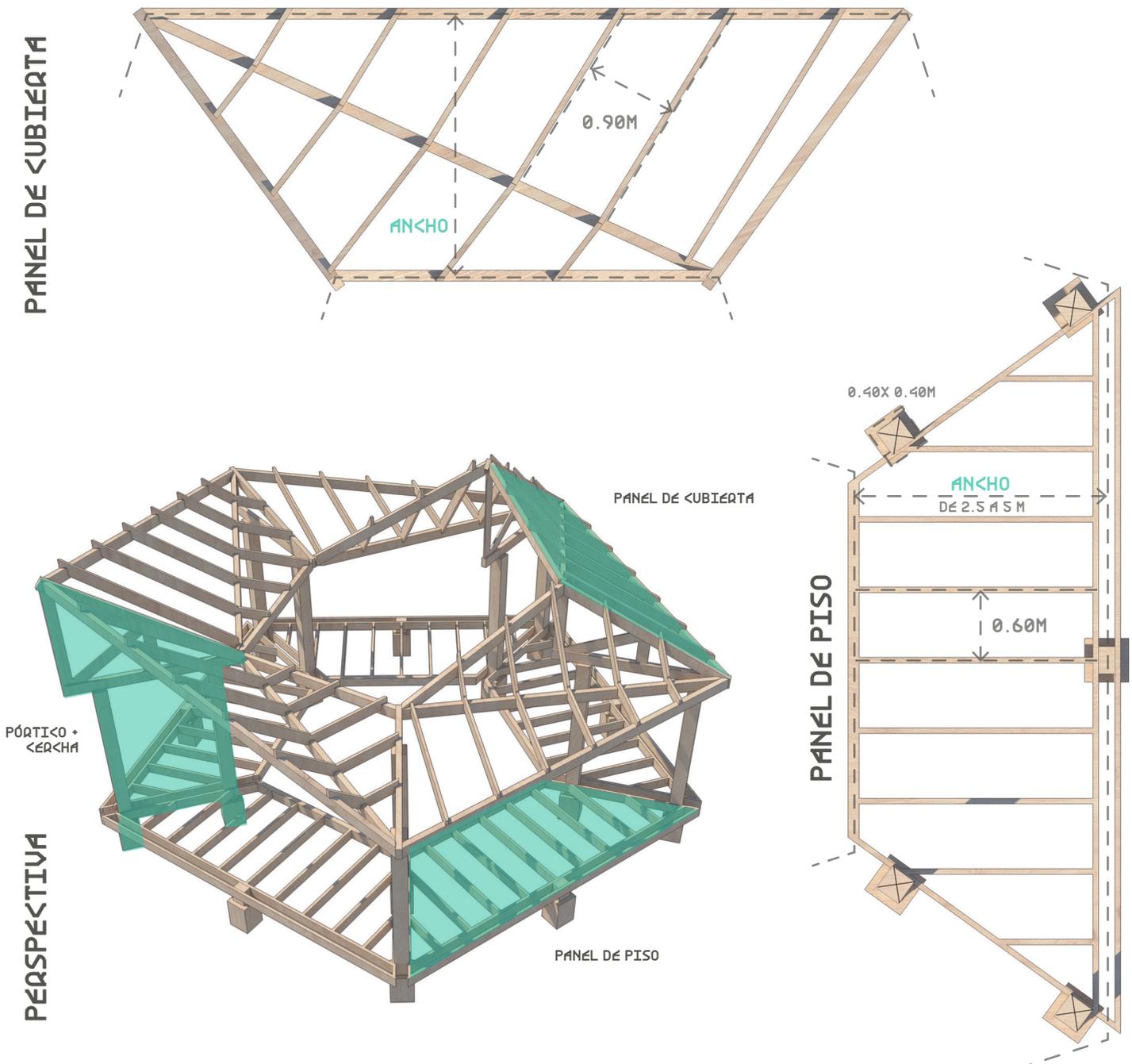
FIGURA 021 Bocetos iniciales de los criterios de diseño

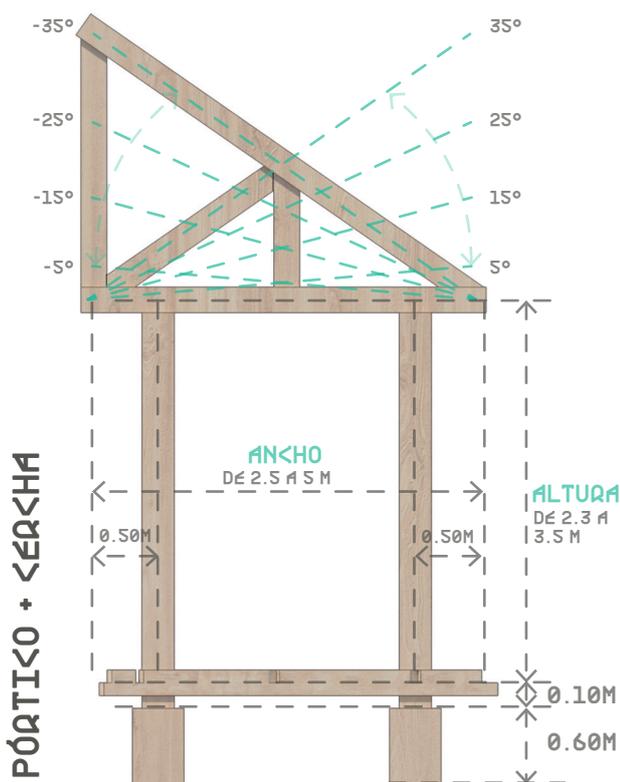
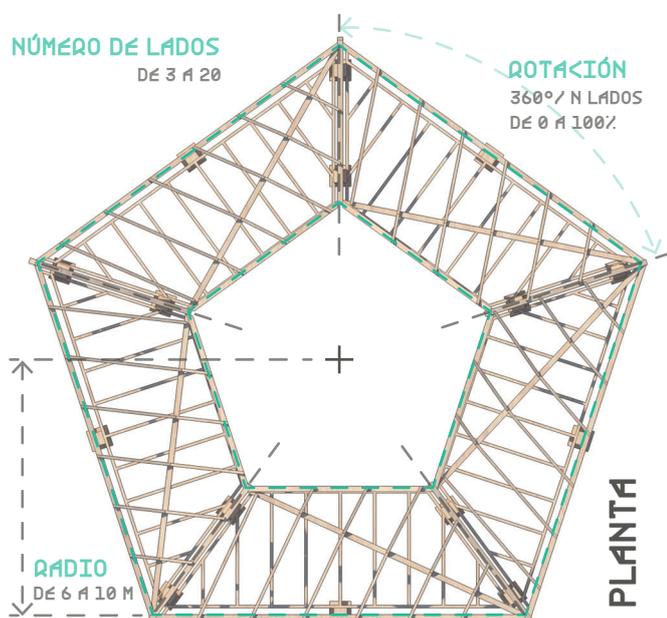


te con la elección de los materiales y el sistema constructivo: elementos rectilíneos y superficies planas. Con el propósito de, a través de esta configuración de la forma más cercana a una

FIGURA 021 Varios bosquejos de los criterios de la propuesta, previos al proceso de parametrización y formulación de los objetivos de diseño.

FIGURA 022 Configuración formal paramétrica del pabellón





estructura **tradicional**, exponer que este método también puede ser aplicado a problemas de diseño habituales y que un modelo paramétrico no necesariamente consiste en formas **extravagantes** difíciles de interpretar como arquitectura.

En conclusión, el **prototipo** del modelo se basa en un sistema constructivo de pórticos compuestos por elementos esbeltos de madera, distribuidos a forma de radios de un polígono de n lados, con una luz entre columnas l y a una distancia x del centroide para delimitar un patio interior (Figura 022). Los pórticos están conformados por una cercha triangular de altura variable, soportada en sus extremos por dos columnas y éstas a su vez sujetan un módulo trapezoidal de suelo entramado; en tanto que la cubierta consiste en, geoméricamente, faldones triangulares que se adaptan a las variaciones de las celosías, compuestos por una serie de cabios perpendiculares a la viga diagonal que atraviesa los módulos trapezoidales de la cubierta, sobre los cuales descansan las correas que permitirán la sujeción de tejas planas. De igual manera que en el caso de estudio, varios elementos fueron agrupados y/o desplazados para mitigar la complejidad de las uniones, lo que permitió realizar el detallado de los ensambles dentro del **código** del pabellón con el objetivo de mejorar la inteligibilidad de la forma de las soluciones sin la necesidad de realizar este refinamiento formal manualmente por cada individuo. Finalmente, a diferencia del proyecto mencionado, la elección de las variables y la configuración del espacio de diseño permiten cierta exploración formal por parte de los objetivos de optimización aunque las estrategias de control sean del tipo directo.

FIGURA 022
El pabellón nace de un polígono original al que se le aplica una serie de operaciones geométricas para trazar cada una de sus partes de modo que todas estén interrelacionadas y soporten cualquier combinación en sus variables sin perder su consistencia, individual y como un todo.

Objetivos de optimización

Como se comentó en el capítulo anterior, además de los objetivos de diseño, existen otros conceptos numéricos que requieren el mismo tratamiento por parte del AG: las restricciones. Es necesario distinguir entre ambos debido a que, si bien es cierto que su formulación es similar, ofrecen un tipo de criterio distinto para el proceso de análisis y toma de decisiones: los objetivos permiten cierta flexibilidad en cuanto a la elección de una solución por sobre otra mientras que las restricciones generalmente representan criterios firmes sobre si un individuo es elegible o no. A continuación, se expone una breve descripción del funcionamiento de cada uno de los seis objetivos de optimización y, además, en la Tabla 003 se presentan todas las variables consideradas y con qué objetivos mantienen una relación directa.

01. Minimizar el sobrante de corte.

Con el afán de reducir al mínimo los excedentes producidos por los cortes de los elementos de madera se consideró como objetivo de diseño a la sumatoria, en metros cúbicos, de los sobrantes obtenidos en el proceso de optimización de corte lineal (Figura 023), después de agrupar todos los elementos de acuerdo a su sección. Dado que se concedió al esquema cierto grado de libertad para elegir qué secciones utilizar, este objetivo de

TABLA 003 Variables y objetivos de diseño

Criterios de aptitud	Genes													
	altura	ancho	radio	rotación	número de lados	elem. estruct. suelo	elem. exterior cercana	elem. interior cercana	elem. vigas cubierta	elem. vigas suelo	elem. cambios cubierta	pos. coordén. x	pos. coordén. y	pendiente cercana (20)
minimizar oclusiones	✓	×	×	✓	×	×	×	×	×	×	×	✓	✓	✓
índice relación volumen/peso	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	✓
min. sobrante de corte	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	✓
elusión de obstáculos	×	✓	✓	✓	✓	×	×	×	×	×	×	✓	✓	×
longitudes bajo el límite permitido	✓	✓	✓	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	✓
deflexiones dentro del rango admisible	×	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	✓

TABLA 003
El sistema propuesto alcanza una complejidad considerable debido a la cantidad de variables, objetivos de optimización y la interacción entre todos los elementos.

FIGURA 023 Diagrama del objetivo 'minimizar el sobrante de corte'

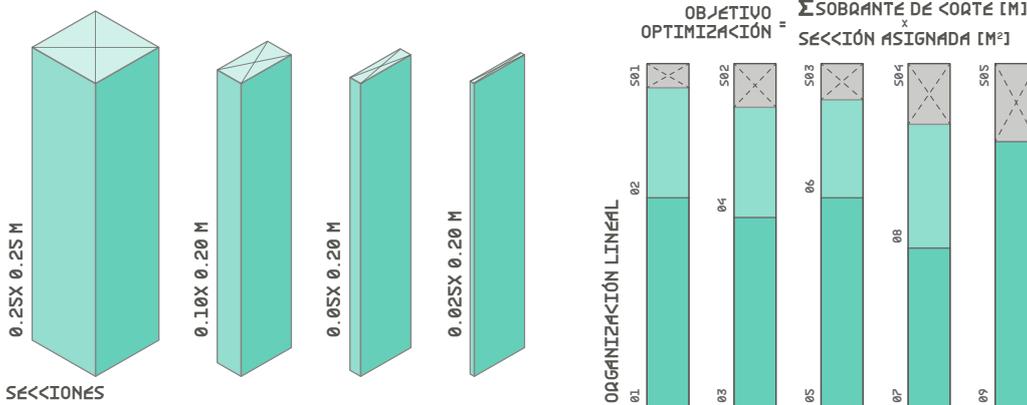


FIGURA 023

Las variables de control de forma junto con la elección del tipo de sección son los principales responsables de un mayor o menor desperdicio de corte.

diseño junto con el estructural deberán hallar un balance entre la utilización de secciones mayores con mejor desempeño mecánico pero con un potencial mayor volumen de desperdicio.

02. Índice relación volumen-peso.

Uno de los objetivos mas significativos del proyecto es converger, dada la configuración estructural propuesta, la búsqueda del AG en individuos con un óptimo uso del material, de manera que se formuló un índice de la relación entre el volumen total de espacio cubierto y el peso de la estructura para favorecer los individuos con una estructura más eficiente dentro de la población que supere las restricciones (Figura 024).

FIGURA 024 Diagrama del objetivo 'índice relación volumen-peso'

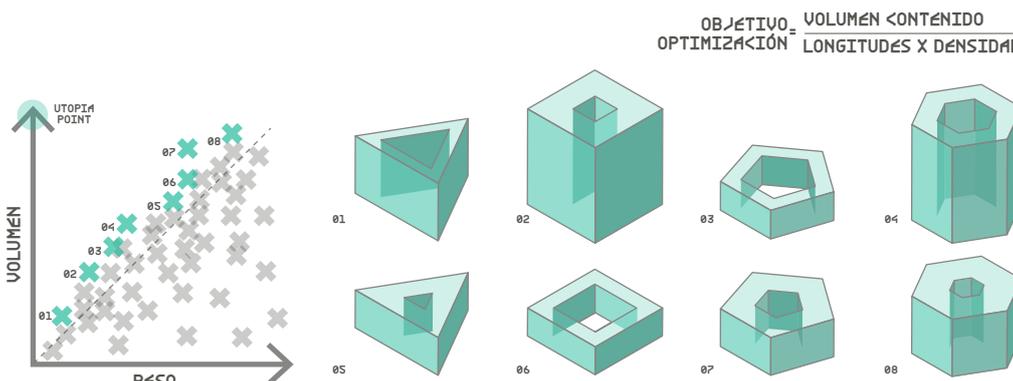


FIGURA 024

Dado que la forma se ve fuertemente restringida por el componente estructural, este objetivo de diseño se ve desplazado a un segundo plano para asistir más como un indicador de optimización que de exploración de forma.

03. oclusiones.

El objetivo formulado concerniente al estudio solar consiste en tratar de reducir la cantidad de sombra arrojada sobre todo el área que abarca el pabellón: espacio cubierto y patio interior (Figura 025). El intervalo de tiempo considerado como muestra para el estudio corresponde a las horas comprendidas entre las 10h y las 15h, cada primer día de los doce meses del año; por lo tanto, se analiza la influencia solar en setenta y dos escenarios distintos por cada individuo. La superficie de análisis es dividida de forma que se aproxime a una cuadrícula que sigue el contorno de la figura, con un número máximo de divisiones en ambos ejes. Este método no asegura el mismo número de puntos de control en figuras con un número de lados distinto, por lo tanto, es conveniente trabajar con un porcentaje de puntos obstruidos sobre el total de cada individuo como forma de solventar parcialmente esta imprecisión dado que aunque la diferencia se vea reducida al aumentar el número de divisiones, esto repercute significativamente en el tiempo de ejecución del AG. Cabe aclarar que este objetivo solamente busca ejemplificar la inclusión del factor climático ya que un análisis integral de este tipo supondría la utilización de componentes adicionales que aumentarían exponencialmente la carga computacional requerida para ejecutar la simulación.

04. Elusión de obstáculos.

Esta restricción se formuló como un sistema de varias estrategias con la finalidad de que el pabellón se halle dentro del límite establecido y no interseque ninguno de los puntos considerados como obstáculos. El compo-

FIGURA 025 Diagrama objetivo 'minimizar oclusiones'

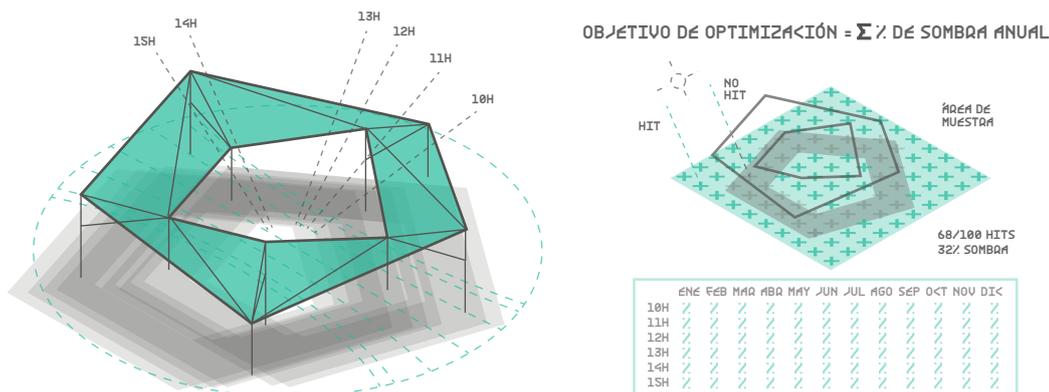


FIGURA 025
Unas pendientes pronunciadas proyectar menor sombra a determinadas horas pero suponen mayores largos y, por tanto, mayor peso de la estructura.

FIGURA 026 Diagrama objetivo 'elusión de obstáculos'

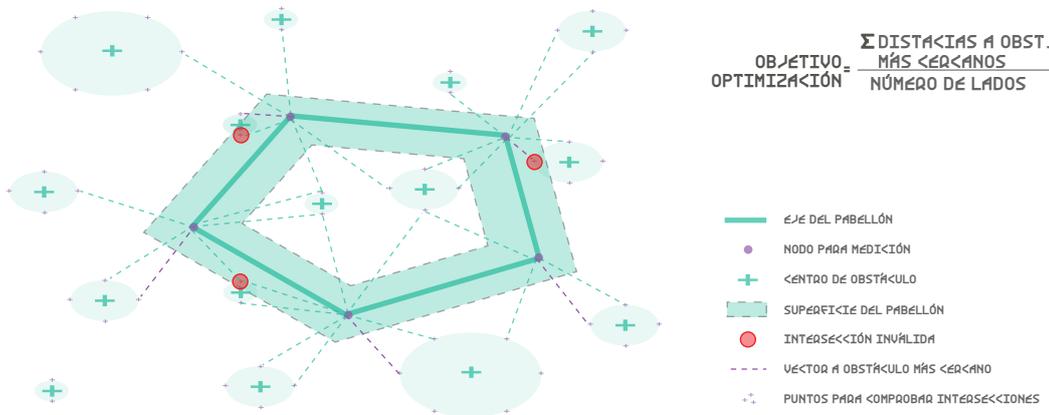


FIGURA 026

El propósito del planteamiento de este objetivo es que los vértices del polígono inicial se mantengan equidistantes de los puntos que representan los obstáculos del sitio.

mente principal es un índice igual a la fracción inversa del promedio de la distancia de cada vértice del polígono central al punto de obstáculo más cercano (Figura 026). Es necesario señalar el empleo de la fracción inversa debido a que se trata de maximizar la distancia a los obstáculos con la intención de que el pabellón **encuentre** un espacio libre de éstos. Para complementar la función del objetivo de optimización, se definió una propiedad del tipo lógica que verifica si, de hecho, existen o no intersecciones entre el pabellón y los obstáculos; y, tras la ejecución del AG, permitirá descalificar las soluciones que no cumplan esta restricción. Además, es importante ajustar las limitaciones de las variables de las coordenadas del emplazamiento para aumentar la probabilidad de generar iteraciones válidas desde la población inicial.

FIGURA 027 Diagrama objetivo 'longitudes bajo el límite permitido'

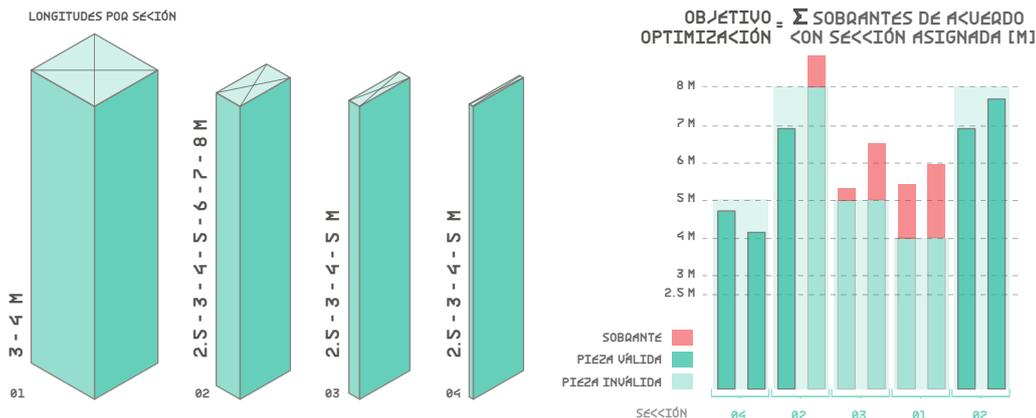


FIGURA 027

La elección de un tipo de sección para un grupo de elementos influye enormemente en la viabilidad de una solución debido a los largos asignados a cada tipo y al rendimiento estructural del material.

05. Longitudes bajo el limite permitido.

Para restringir el uso de empalmes, se asumió como objetivo de optimización a la sumatoria del **potencial** exceso del largo de la pieza necesaria por sobre la máxima de las longitudes disponibles (Figura 027); de este modo el AG buscará reducir este índice a cero para tratar de evitar que no existan longitudes superiores a las delimitadas. Es necesario aclarar que, ya que todos los objetivos tienen la misma importancia para el AG, es posible que en un porcentaje de las soluciones este valor no sea un cero absoluto; por lo tanto, paralelamente, se considera una propiedad **lógica** (verdadero o falso) que indica si existen elementos fuera del rango permitido para filtrar las soluciones inválidas.

06. Deflexiones dentro del rango admisible.

Dado que una de las restricciones más importantes dentro de un proyecto arquitectónico es el componente estructural, es imprescindible incluir, por lo menos, un factor para juzgar su rendimiento en este aspecto, como lo es la medición de las deformaciones de las vigas. Por supuesto a modo de ejemplo ya que un correcto estudio estructural comprende una mayor cantidad de cálculos y consideraciones técnicas; dicho esto, es preciso señalar que para este ejercicio se consideraron únicamente cargas **no-sísmicas**, en otras palabras, no se incluyeron fuerzas laterales en el estudio de viabilidad la estructura. Esta acotación en las fuerzas que intervienen en el cálculo estructural limitó la formulación de las variables relativas a la elección de los perfiles (Tabla 002) para cada tipo de elemento, esto es, a ciertos elementos no se les permitió iterar entre todos los perfiles expuestos debido a que sus propiedades geométricas no posibilitan un desempeño competente cuan-

FIGURA 028 Diagrama objetivo 'deflexiones dentro del rango admisible'

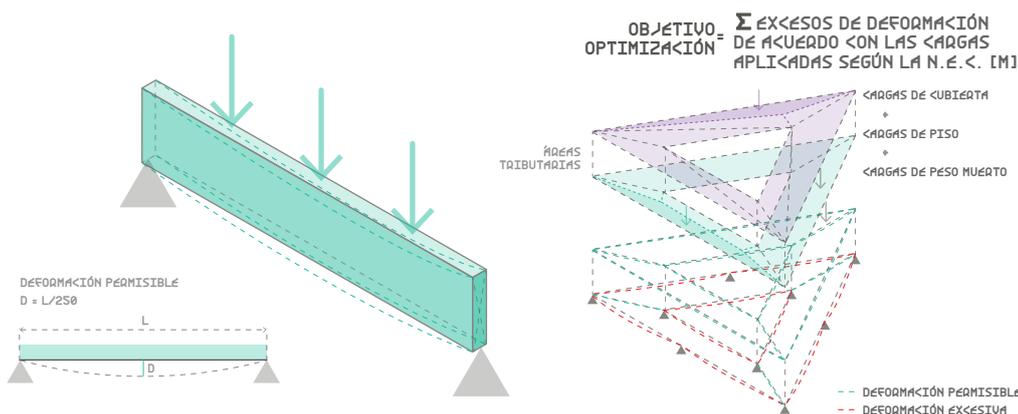


FIGURA 028 La configuración formal elegida supone un gran reto para el desempeño de la estructura en ciertos elementos como el lado más largo del panel trapezoidal de suelo o la diagonal que divide en dos a los paneles de cubierta.

do las fuerzas sísmicas sacuden la estructura desde direcciones distintas. Ahora bien, la restricción que debe cumplir la estructura es que ningún elemento presente una deformación superior a la permisible, por lo tanto, el índice a minimizar será la sumatoria de las deformaciones, en milímetros, que superan el límite establecido por la norma (Figura 028); además, se definió otra propiedad lógica que indica si existe algún elemento que no satisfaga este requerimiento estructural para posteriormente depurar el grupo de soluciones factibles.

En primer lugar, de acuerdo con la **Guía práctica para el diseño de estructuras de madera de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015**, sección 2.4 **Deflexiones máximas admisibles**, las deflexiones deben ser verificadas al aplicar la combinación más desfavorable de cargas permanentes y sobrecargas de servicio. Dado que no estamos considerando cielos rasos u otros acabados que pudieran ser afectados por las deformaciones, la máxima deflexión admisible corresponde a la fórmula $d = L/K$, donde L representa la luz entre los apoyos y K toma un valor de 250. Las cargas vivas proyectadas sobre la estructura se dividen en dos tipos de acuerdo con su lugar de aplicación: cargas de piso y de cubierta. Estas cargas se distribuyen, como cargas puntuales, a los elementos perimetrales de los módulos de suelo y los faldones de la cubierta, respectivamente, en función del área tributaria de cada elemento. Entonces, según la **Norma ecuatoriana de la construcción NEC-SE-CG Cargas no sísmicas**, tabla 9, el valor de la carga viva del piso del pabellón corresponde a 4.80 kN/m², dado que se puede entender este espacio como una **plataforma de reunión** dentro de la sección de **áreas de reunión y teatros**; asimismo, el elemento **cubiertas planas, inclinadas y curvas** especifica una carga uniforme de 0.70 kN/m² para ser suministrada a los faldones triangulares de la cubierta. En cuanto al peso muerto de la estructura, el volumen de cada elemento lineal del armazón permite calcular el peso que ejerce cada pieza y proyectar dicha fuerza desde su centro de gravedad correspondiente.

Finalmente, de acuerdo con la sección 3.4.3 **Combinación para el diseño por última resistencia**, la combinación 2 especifica un factor de mayoración de 1.2 para las cargas permanentes, 1.6 para las sobrecargas y 0.5 para la máxima de entre la sobrecarga de cubierta, la carga de granizo y el factor de reducción. Por lo tanto, una vez administrada esta combinación de fuerzas a la estructura, el AG tratará de ajustar las variables concernientes, como secciones y dimensiones de la estructura, para mantener las deflexiones de sus miembros dentro del rango permisible.

Esquema del modelo

Como se indicó anteriormente, el esquema del modelo se puede estructurar de acuerdo al rol que cumple cada nodo dentro de este sistema holístico: datos de entrada, composición de forma, objetivos de diseño y algoritmo genético (y análisis); no obstante, el esquema final del pabellón (Figura 029), desarrollado con cierto grado de prueba y error, expresa algunas características específicas que es necesario comentar aunque tal vez no sean aplicables a todos los problemas de diseño arquitectónico:

- 01.** Es recomendable mantener siempre un esquema ordenado para evitar redundar en el código con conexiones que vuelvan a generar información que ya está siendo tratada en otra región del esquema (B y C); además de mantener las variables o parámetros organizados para un rápido acceso y modificación (A).
- 02.** Es necesaria la organización de las geometrías de acuerdo a su propósito (D), ya que diferentes procesos como el cálculo estructural o la medición del material en bruto requieren un tratamiento ligeramente distinto para devolver resultados acertados.
- 03.** Es indispensable discriminar los nodos que no participan directamente en los procesos de cálculo de los objetivos de optimización (E4) de modo que puedan ser deshabilitados para aligerar el trabajo del AG.

FIGURA 029 Esquema desarrollado

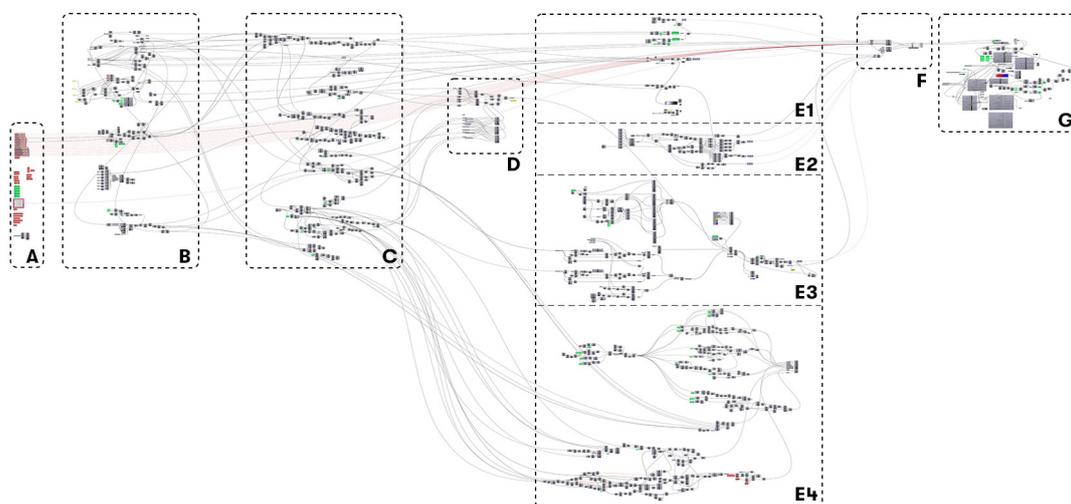


FIGURA 029

La practicidad al momento de navegar el esquema y la función de los fragmentos del código derivaron en esta configuración final:

- A. Datos de entrada.
- B. Geometría inicial.
- C. Composición de la forma.
- D. Conjuntos de geometrías.
- E1. Objetivos de optimización de diseño varios.
- E2. Objetivos de optimización referidos a medición de longitudes.
- E3. Cálculo estructural.
- E4. Procesos no esenciales (generación de geometrías tridimensionales).
- F. Algoritmo genético.
- G. Análisis y visualización de resultados.

Análisis de resultados

Como se muestra en la Tabla 003, el número de variables asciende a 33, ya que el último parámetro (pendientes de cada cercha) corresponde a un grupo de 20 variables independientes, equivalente al máximo número de lados. Además, dado que ciertos aspectos del diseño no exigen una precisión muy elevada, se logró moderar el número de valores distintos que estas variables pudieran tomar: un total de **411 valores diferentes** entre todas ellas. En conclusión, este número de variables y valores producen un espacio de diseño de **2³⁰ posibilidades distintas**. Cabe mencionar que al investigar la bibliografía existente no se encontraron referencias a la población necesaria de acuerdo con algún tipo de indicador; por lo tanto, la simulación se llevó a cabo con un tamaño de generación igual a 50 individuos, a través de 100 generaciones (valores estándar de Wallacei), es decir, se calcularon los valores de aptitud de una población de 5000 soluciones (Figura 032), proceso que ocupó alrededor de 12 horas con un procesador de 6 núcleos a 2.2 GHz y una memoria RAM de 16gb.

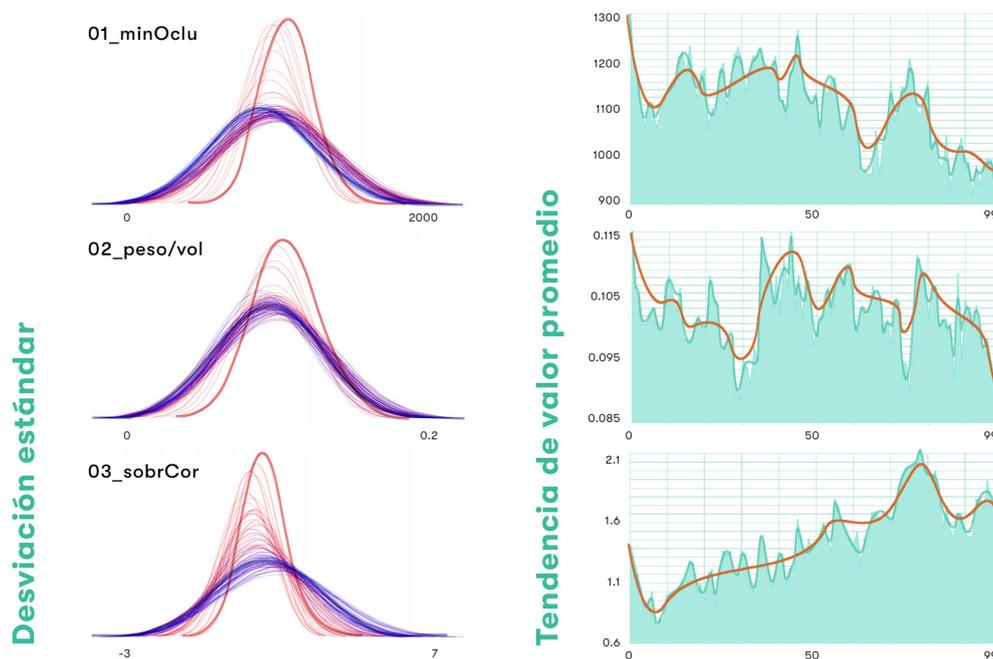
Gracias a las gráficas de **desviación estándar** y de **tendencia de valor promedio** podemos realizar un rápido diagnóstico de la simulación y los objetivos de diseño (Figura 030): los objetivos '01 minimizar oclusiones' y '02 índice peso/volumen' muestran que la desviación estándar tiende, moderadamente, hacia la izquierda junto con el avance de la simulación (curvas azules), es decir, el rendimiento presenta un desarrollo evidente pero irregular, como lo muestran las gráficas de valor promedio; además, la cresta se vuelve menos pronunciada, lo que implica una distribución más heterogénea del rendimiento de las soluciones. Sin embargo, el objetivo '03 minimizar sobrante de corte', aunque también muestra una distribución de soluciones más dispersa, no presenta una mejoría en la tendencia de valor promedio, como se evidencia en su gráfica correspondiente de la segunda columna.

Al analizar toda esta población generada, se encontraron **58 soluciones válidas** (Tabla 004) que cumplieran con las tres restricciones autoimpuestas: evasión de obstáculos, largo de piezas y rendimiento estructural; sin embargo, es importante mencionar que la distribución de estas soluciones muestra una tendencia irregular: una distribución abultada en la primera mitad de la simulación con un pico entre las generaciones 39 y 45, y un gran vacío en el intervalo comprendido por las generaciones 50 y 80 (Figura 031). A continuación, en la Figura 032, gráfico de coordenadas paralelas, se observa cada una de las 5000 líneas que representan todas las soluciones analiza-

das con una tonalidad de acuerdo con su número de generación; se muestran los rendimientos en todos los objetivos de optimización (A) y solamente en los objetivos de diseño (B).

En la Tabla 004 se exponen los valores que presentan las variables de estas 58 soluciones o, en otras palabras, su secuencia genética; un rápido vistazo es suficiente para percatarse de que existen soluciones con idéntica composición en sus variables; en consecuencia, los rendimientos de estas soluciones también muestran repetición, como se observa en la Figura 033; asimismo, se pueden apreciar por separado los valores de aptitud de las soluciones válidas en Figura 034, Figura 035 y Figura 036. Esta duplicidad mencionada se expone en la Tabla 005, donde observamos que una modesta cantidad de 10 grupos únicos comprenden de entre 1 a 14 soluciones cada uno y, generalmente, respetan un orden de acuerdo con su número de generación; este patrón se puede apreciar de mejor manera en la Tabla 004 gracias a la escala de tonalidades. Además, las configuraciones de las 10 soluciones únicas se exponen en la Tabla 006 y, gráficamente, en la Figura 038 junto con algunas de sus variables de exploración de forma.

FIGURA 030 Resultados generales de la simulación



Ahora, de este sintetizado grupo de soluciones, y gracias a los datos de la Tabla 005, reflejados visualmente en la GCP de la Figura 037, se puede realizar una selección mas específica de acuerdo a los siguientes criterios:

FIGURA 030
La influencia de las restricciones provoca cierta irregularidad en la optimización de los objetivos de diseño.

- 01.** Mejor rendimiento en el objetivo ‘minimizar oclusiones’.
- 02.** Mejor rendimiento en el objetivo ‘índice peso/volumen’.
- 03.** Mejor rendimiento en el objetivo ‘minimizar sobrante de corte’.
- 04.** Mejor diferencia relativa entre sus clasificaciones en los tres objetivos de diseño.
- 05.** Mejor promedio de clasificación entre los tres objetivos de diseño.

Por consiguiente, se encontró que los mejores candidatos de los tres objetivos son las soluciones **8**, **4** y **2**, respectivamente; mientras que, la solución preferida de acuerdo a los dos últimos criterios es la solución **6**. En la Figura 039 se expone una representación gráfica más detallada de cada una de estas soluciones junto con un gráfico de diamante e información adicional relevante. Finalmente, para concluir la investigación con la documentación del pabellón, supondremos una predilección por la solución con rendimientos más equilibrados, es decir, la **solución 1 de la generación 41**, correspondiente al **grupo 6**.

FIGURA 031 Distribución de soluciones válidas

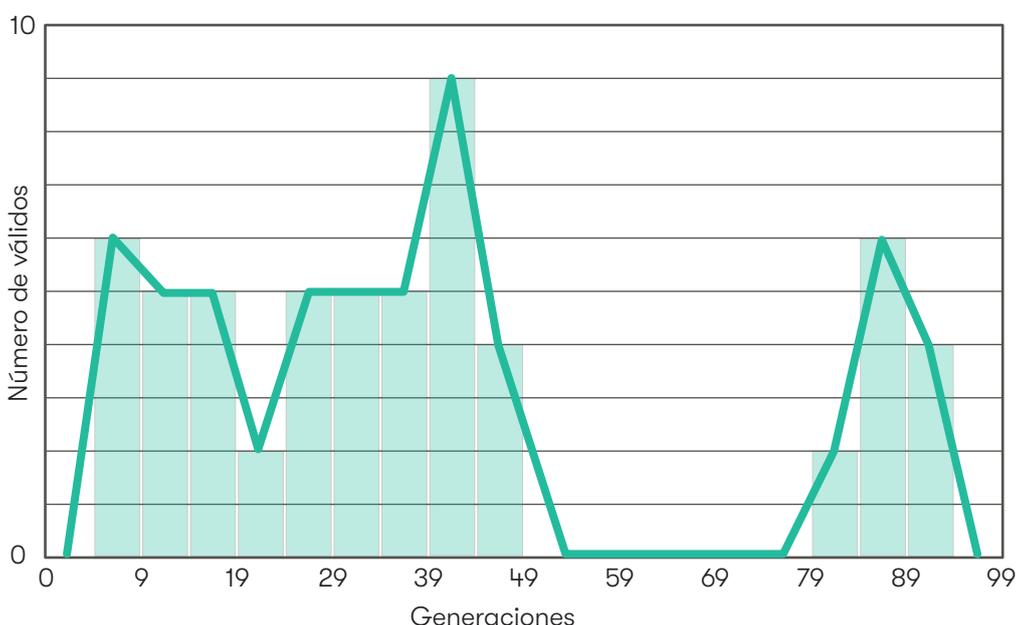
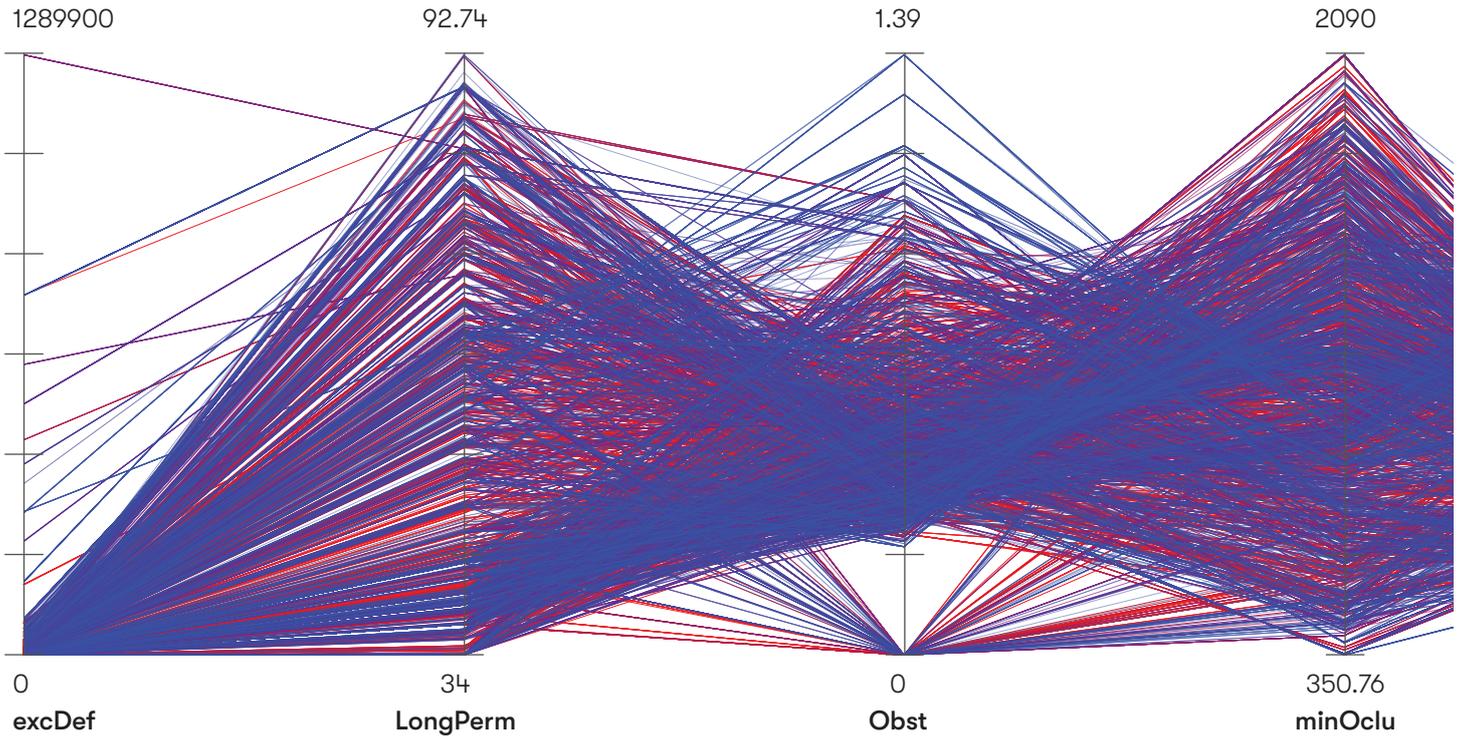


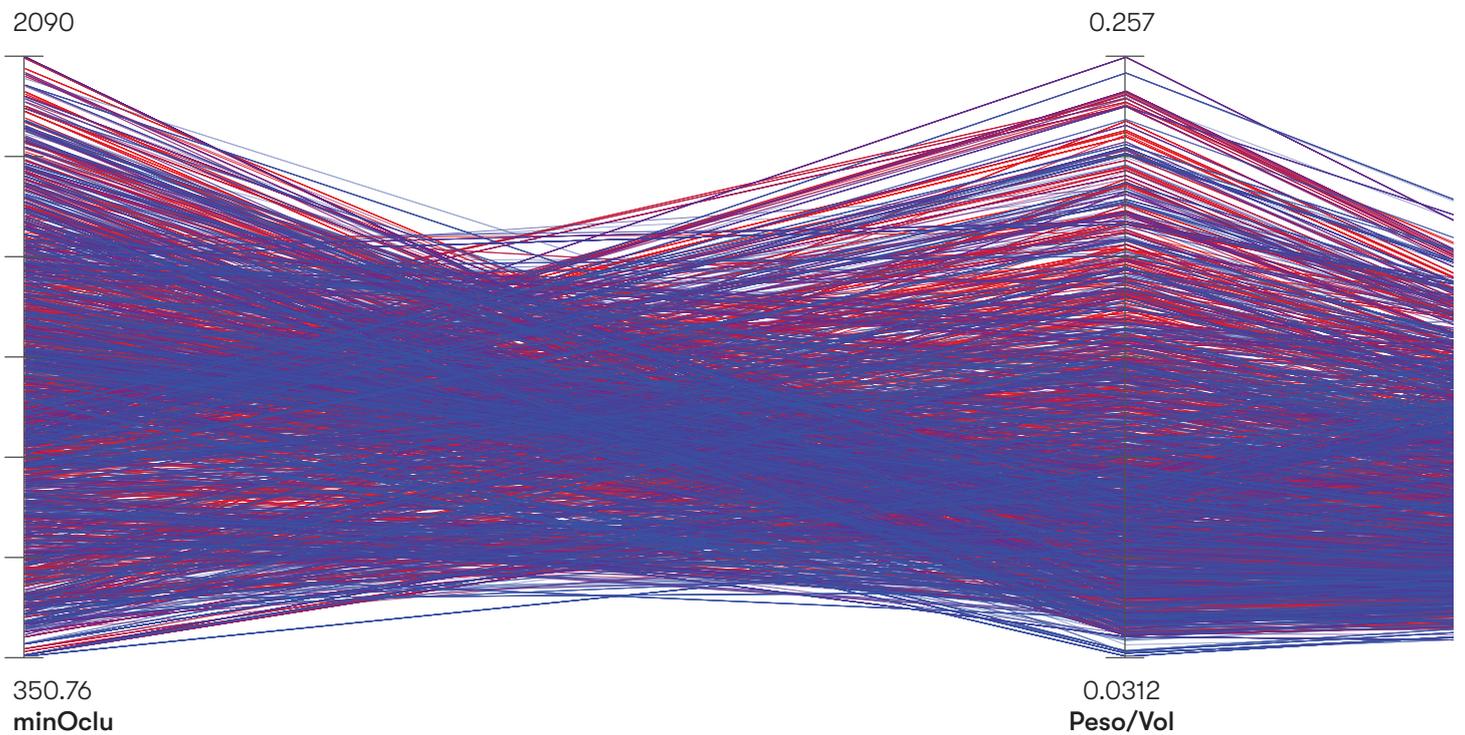
FIGURA 031
En este diagrama de barras se expone la distribución del número de soluciones válidas encontradas en la simulación, en grupos de 5 generaciones.

FIGURA 032 Gráfico de coordenadas paralelas de la simulación (GCP)

A) Restricciones + Objetivos de diseño



B) Objetivos de diseño



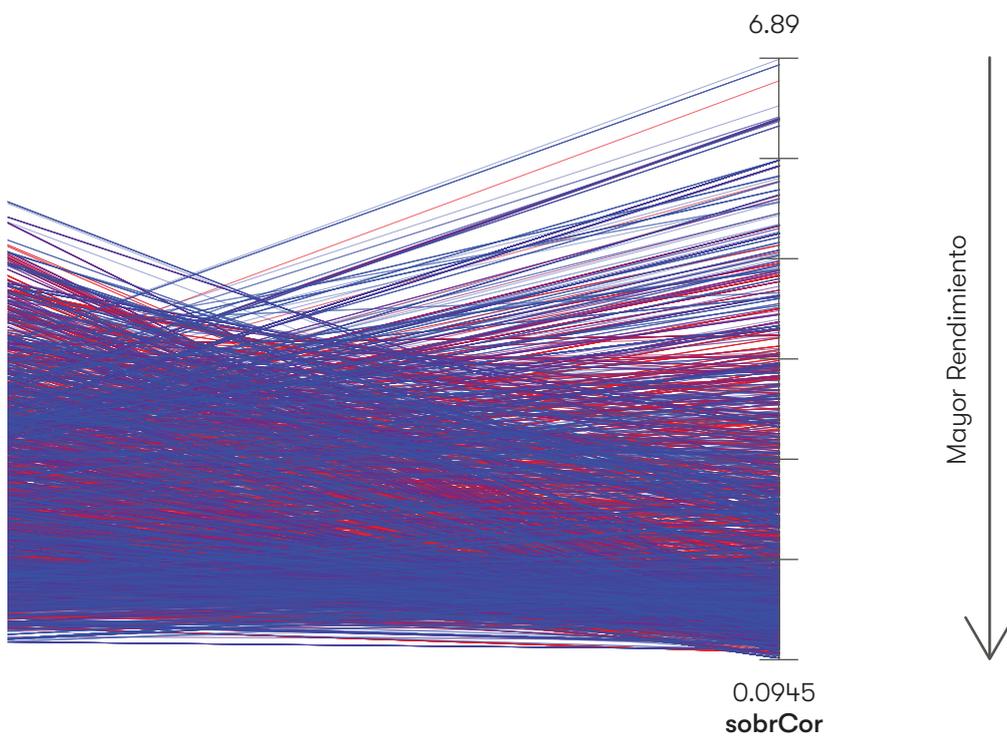
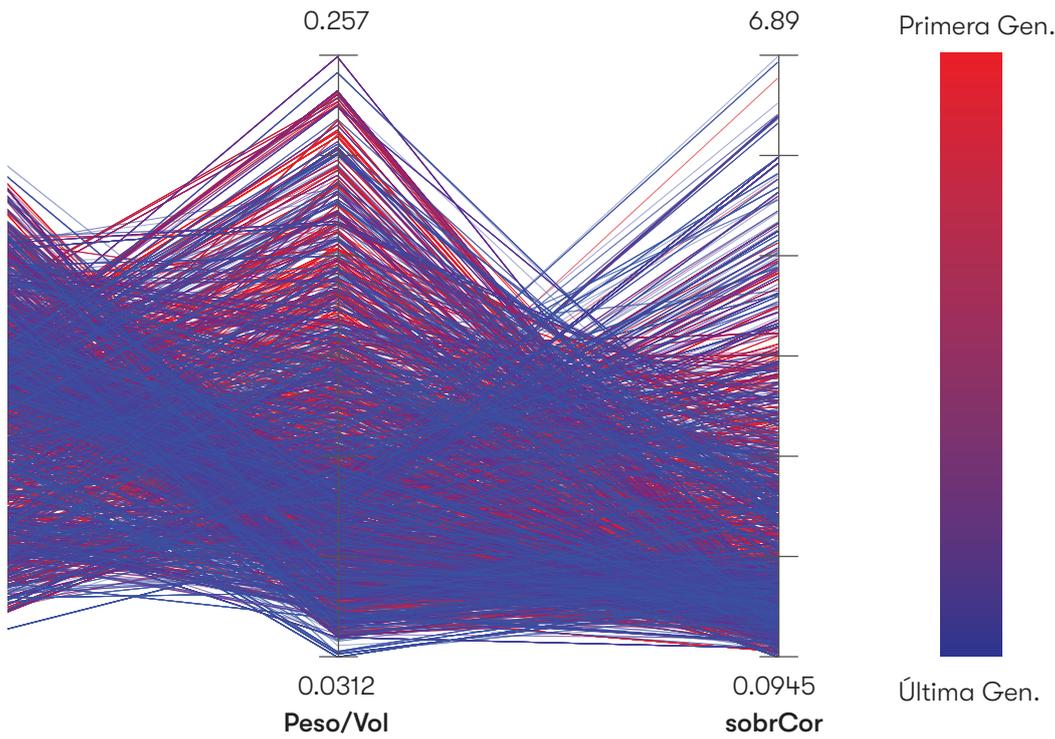


FIGURA 032

En el GCP cada línea representa una única solución y muestra sus valores de aptitud en cada objetivo de optimización con el propósito de comprender cómo las soluciones buscan un mejor rendimiento a lo largo de la simulación. El resultado deseado es que las líneas azules, pertenecientes a las generaciones posteriores, se concentren en la zona inferior de la gráfica, donde se hallan los mejores rendimientos.

3	3	0	3	4	2	4	6	5	3	5	5	0
3	3	0	3	4	2	4	6	5	3	5	5	0
3	3	0	3	4	2	4	6	5	3	5	5	0
3	3	0	3	4	2	4	6	5	3	5	5	0
3	3	0	3	4	2	4	6	5	3	5	5	0
3	3	0	3	4	2	4	6	5	3	5	5	0
4	3	5	3	4	6	4	6	5	3	5	5	0
4	3	5	3	4	6	4	6	5	3	5	5	0
4	3	5	3	4	6	4	6	5	3	5	5	0
4	3	5	3	4	6	4	6	5	3	5	5	0
4	3	5	3	4	6	4	6	5	3	5	5	0
4	3	5	3	4	6	4	6	5	3	5	5	0
4	3	5	3	4	6	4	6	5	3	5	5	0
4	3	5	3	4	6	4	6	5	3	5	5	0
4	3	5	3	4	6	4	6	5	3	5	5	0
4	3	5	3	4	6	4	6	5	3	5	5	0
4	3	5	3	4	6	4	6	5	3	5	5	0
4	3	5	3	4	6	4	6	5	3	5	5	0
5	2	0	3	6	1	6	1	6	6	2	5	2
5	2	0	3	6	1	6	1	6	6	2	5	2
5	2	0	3	6	1	6	1	6	6	2	5	2
5	2	0	3	6	1	6	1	6	6	2	5	2
5	2	0	3	6	1	6	1	6	6	2	5	2
5	2	0	3	6	1	6	1	6	6	2	5	2
5	2	0	3	6	1	6	1	6	6	2	5	2
5	2	0	3	6	1	6	1	6	6	2	5	2
5	2	0	3	6	1	6	1	6	6	2	5	2
5	2	0	3	6	1	6	1	6	6	2	5	2
5	2	0	3	6	1	6	1	6	6	2	5	2
5	2	0	3	6	1	6	1	6	6	2	5	2
5	2	0	3	6	1	6	1	6	6	2	5	2
5	2	0	3	6	1	6	1	6	6	2	5	2
5	2	0	3	6	1	6	1	6	6	2	5	2
5	3	0	6	5	5	3	5	5	5	4	6	3
5	3	0	6	5	5	3	5	5	5	4	6	3
5	3	0	6	5	5	3	5	5	5	4	6	3
5	4	0	7	5	5	3	5	5	5	4	6	3
5	3	0	6	5	5	3	5	5	5	4	6	3
5	3	0	6	5	5	3	5	5	5	4	6	3
5	4	0	7	5	5	3	5	5	5	4	6	3
5	3	0	6	5	5	3	5	5	5	4	6	3
5	3	0	6	5	5	3	5	5	5	4	6	3
5	4	0	7	5	5	3	5	5	5	4	6	3
5	4	0	7	5	5	3	5	5	5	4	6	3
5	2	1	7	6	2	1	1	4	5	3	6	3
3	2	1	6	2	1	1	1	6	6	3	5	3
3	2	1	6	2	1	1	1	6	6	3	5	3
3	2	1	6	2	1	1	1	6	6	3	5	3
3	2	1	6	2	1	1	1	6	6	3	5	3
3	2	1	6	2	1	1	1	6	6	3	5	3
3	3	2	6	0	1	2	1	6	6	3	5	3
3	2	1	6	2	1	1	1	6	6	3	5	3
3	2	1	6	2	1	1	1	6	6	3	5	3
3	2	1	6	2	1	1	1	6	6	3	5	3
3	2	4	6	7	1	1	1	6	2	3	5	3
3	2	4	6	7	1	1	1	6	2	3	5	3

TABLA 004
 La tabla de secuencia genética muestra qué valor toma cada variable, lo que permite analizar el comportamiento de la simulación y determinar el rango de variación entre las soluciones válidas.

FIGURA 033 Gráfica de aptitud combinada de las soluciones válidas

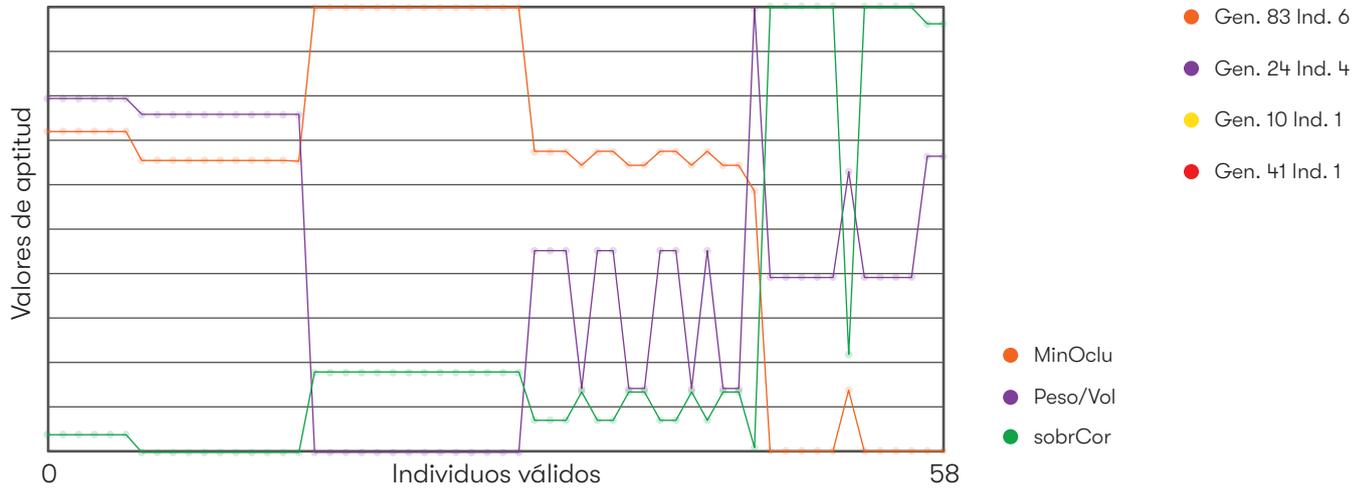


FIGURA 034 Gráfica de aptitud del objetivo 'minimizar oclusiones'



FIGURA 035 Gráfica de aptitud del objetivo 'índice peso-volumen'

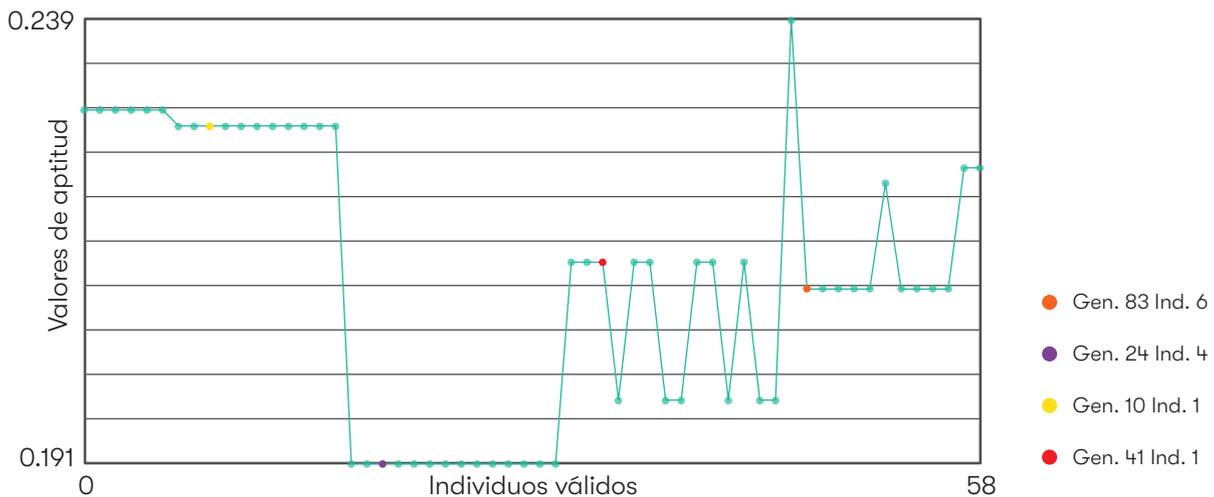


FIGURA 036 Gráfica de aptitud del objetivo 'minimizar sobrante de corte'

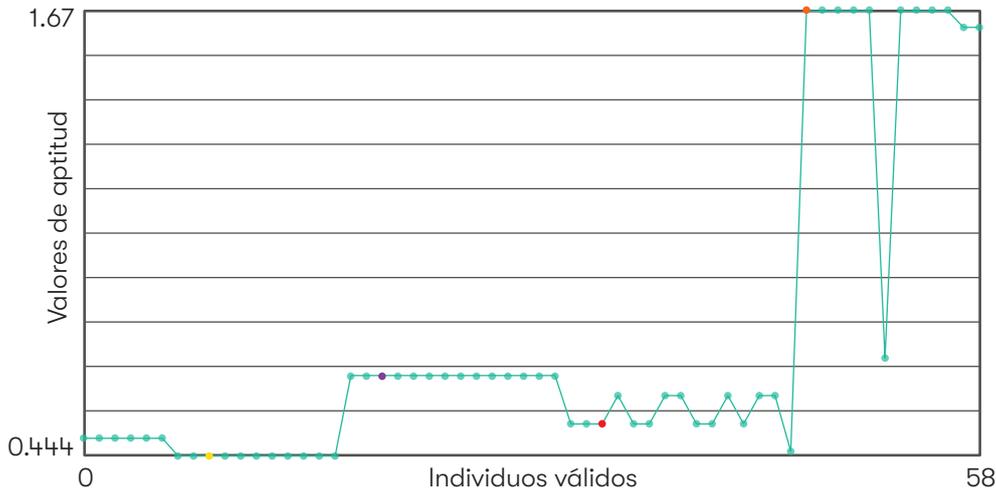


TABLA 005 Grupos de soluciones válidas únicas

Grupo único	n	Soluciones {Gen.; Ind.}	Generación Promedio	minOclu	peso/vol	sobrCor [m³]
1	6	{6;4} {7;8} {8;2} {8;40} {9;9} {9;13}	7.83	1083.46	0.229	0.492
2	10	{10;1} {11;6} {12;6} {13;6} {14;2} {15;6} {16;5} {17;8} {18;11} {19;4}	14.5	1070.65	0.227	0.444
3	1	{20;6}	20	1070.32	0.227	0.445
4	14	{24;4} {25;15} {26;3} {27;10} {28;4} {29;9} {30;1} {31;5} {32;13} {33;18} {34;3} {35;3} {35;10} {36;10}	30.36	1139.72	0.191	0.665
5	8	{38;38} {39;16} {40;45} {41;15} {42;3} {43;11} {44;3} {45;12}	41.5	1074.72	0.212	0.532
6	6	{41;1} {42;39} {43;1} {44;15} {45;18} {46;19}	43.5	1068.51	0.198	0.610
7	1	{48;16}	48	1057.08	0.239	0.457
8	9	{83;6} {84;9} {85;16} {86;15} {87;17} {88;41} {89;3} {90;35} {91;27}	87	941.46	0.210	1.673
9	1	{88;5}	88	968.81	0.221	0.713
10	2	{92;10} {93;4}	92.5	941.52	0.223	1.629

FIGURA 033

Comparación de los valores de aptitud de los tres objetivos de diseño, donde se aprecian las agrupaciones de la Tabla 005.

FIGURA 034

Valores de aptitud del objetivo 'minimizar oclusiones'.

FIGURA 035

Valores de aptitud del objetivo 'índice peso/volumen'.

FIGURA 036

Valores de aptitud del objetivo 'minimizar sobrante de corte'.

FIGURA 037 GCP de los grupos de soluciones válidas únicas

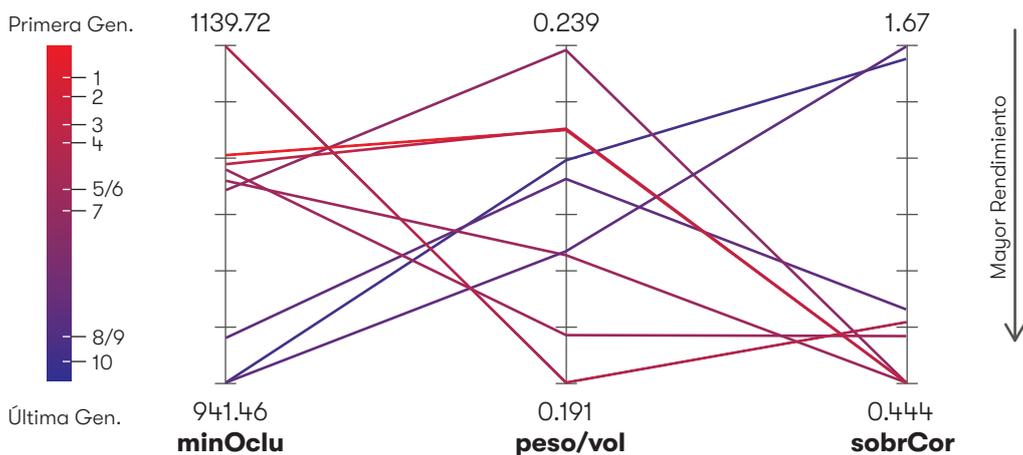


TABLA 005

Agrupación de soluciones válidas de acuerdo a la configuración de sus variables.

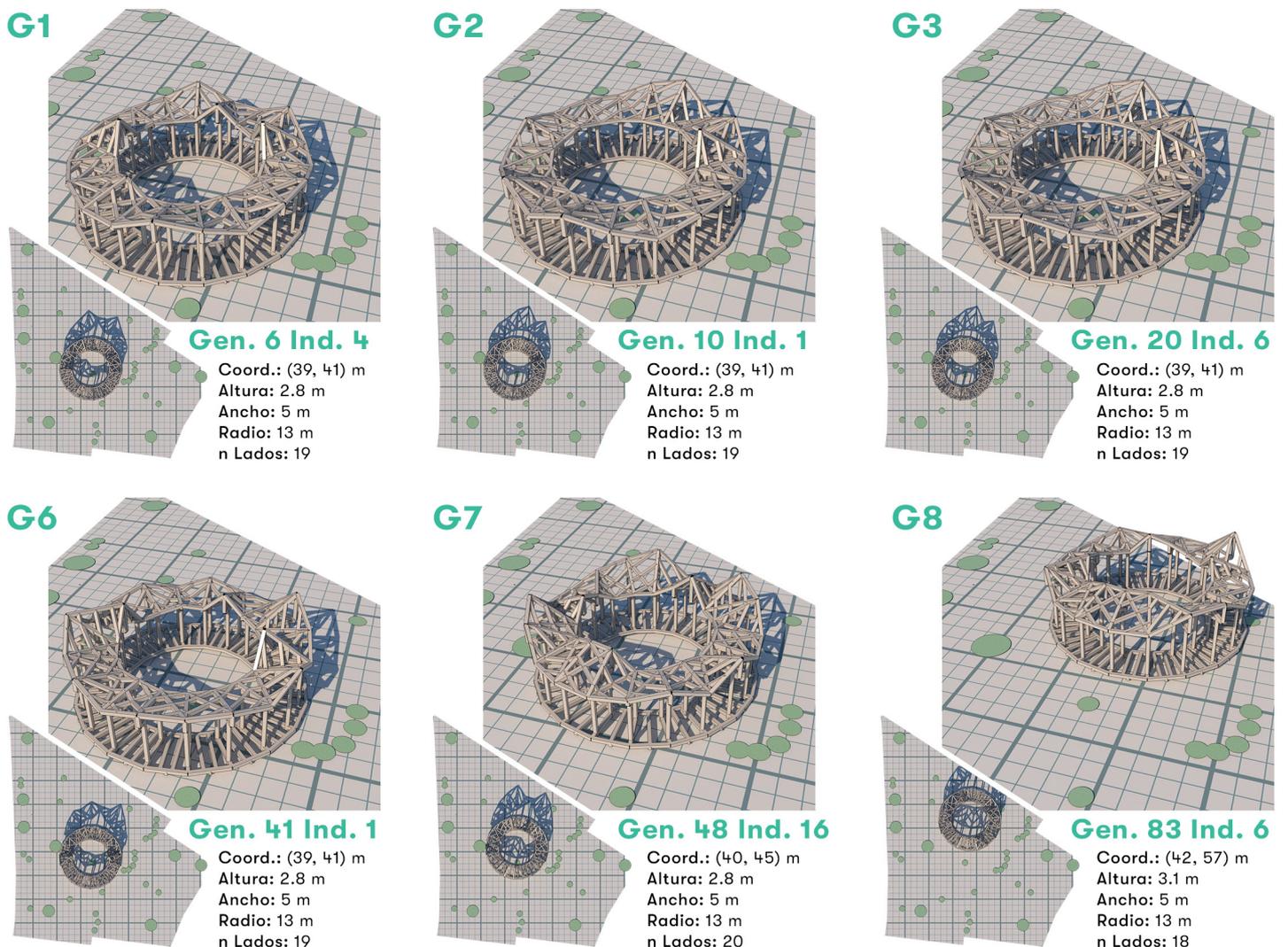
FIGURA 037

Cada grupo de soluciones válidas es representado por el color correspondiente a su número de generación promedio.

TABLA 006 Secuencia genética de las soluciones válidas únicas

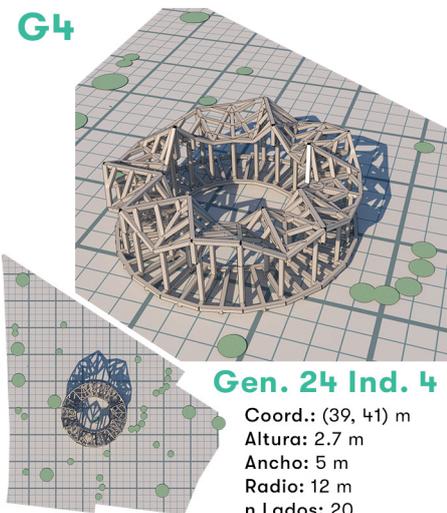
		altura	ancho	radio	rotación	n lados	estruct. suelo	ext. cercha	interior cercha	vigas cubierta	vigas suelo	cambios cubierta	pos. coord. x	pos. coord. y	Pendientes cercha						
G1	Gen. 6 Ind. 4	2.8	5	13	0.57	19	2	1	2	1	1	2	39	41	3	0	6	3	1	6	4
G2	Gen. 10 Ind. 1	2.8	5	13	0.01	19	2	1	2	1	1	2	39	41	3	0	6	3	7	6	4
G3	Gen. 20 Ind. 6	2.8	5	13	0.03	19	2	1	2	1	1	2	39	41	3	0	6	3	7	6	4
G4	Gen. 24 Ind. 4	2.7	5	12	0.24	20	3	2	3	2	1	2	39	41	3	0	6	5	1	6	5
G5	Gen. 38 Ind. 38	2.8	5	13	0.19	20	2	1	3	1	1	3	39	41	5	6	7	3	2	5	4
G6	Gen. 41 Ind. 1	2.8	5	13	0.22	19	2	1	3	1	3	3	39	41	0	5	7	3	1	5	3
G7	Gen. 48 Ind. 16	2.8	5	13	0.62	20	2	1	2	1	1	1	40	45	3	6	7	0	2	7	6
G8	Gen. 83 Ind. 6	3.1	5	13	0.24	18	2	1	2	1	3	1	42	57	3	1	7	3	2	1	5
G9	Gen. 88 Ind. 5	2.7	5	13	0.24	18	2	1	3	1	3	1	42	57	3	1	7	3	2	5	5
G10	Gen. 92 Ind. 10	3.1	5	13	0.24	18	2	1	2	1	1	1	42	57	3	6	7	3	2	1	5

FIGURA 038 Representación gráfica de las soluciones válidas únicas

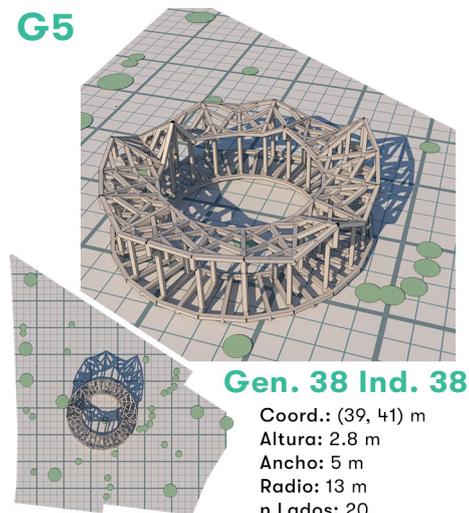


3	3	0	3	4	2	4	6	5	3	5	5	0
4	3	5	3	4	6	4	6	5	3	5	5	0
4	3	5	3	4	6	4	6	5	3	5	5	0
5	2	0	3	6	1	6	1	6	6	2	5	2
5	3	0	6	5	5	3	5	5	5	4	6	3
5	4	0	7	5	5	3	5	5	5	4	6	3
5	2	1	7	6	2	1	1	4	5	3	6	3
3	2	1	6	2	1	1	1	6	6	3	5	3
3	3	2	6	0	1	2	1	6	6	3	5	3
3	2	4	6	7	1	1	1	6	2	3	5	3

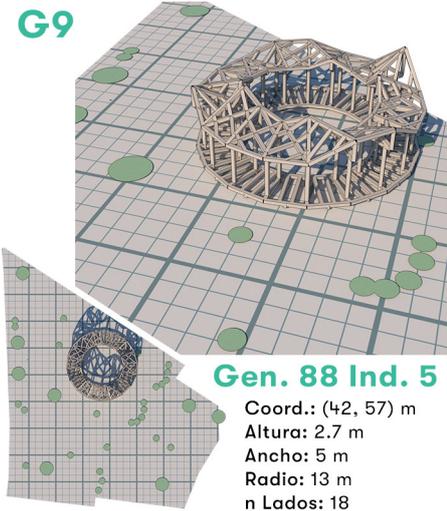
G4



G5



G9



G10

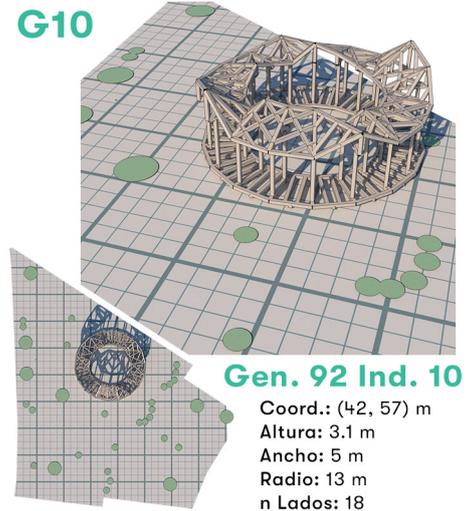


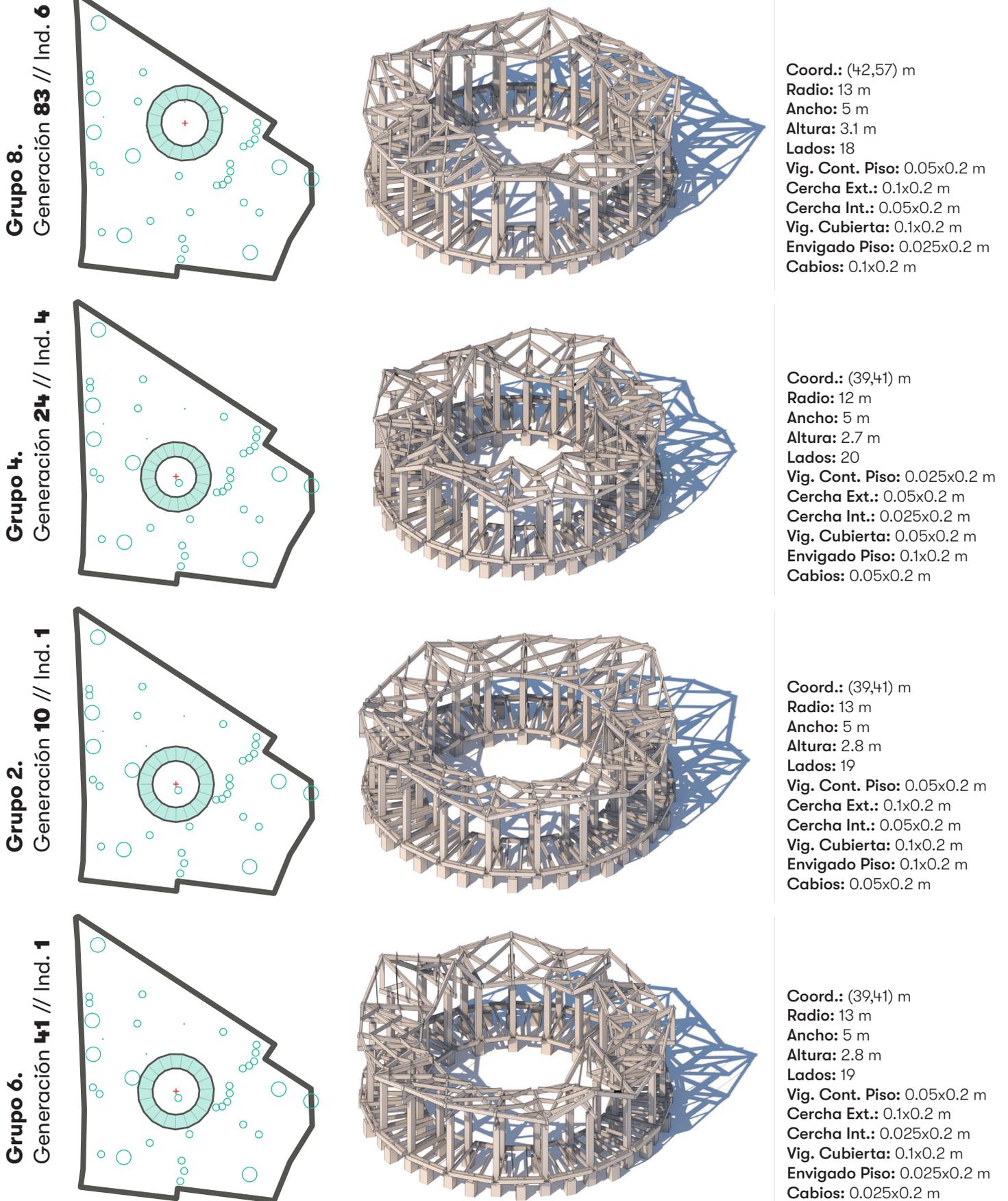
TABLA 006

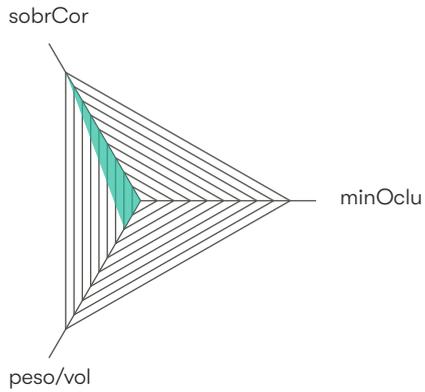
La información genética de las soluciones válidas únicas presenta cierta similitud en algunas variables como el ancho y el radio; mientras que plantea variedad en otras, como en las pendientes de las cerchas.

FIGURA 038

Las soluciones válidas únicas se muestran similares a simple vista debido a que las variables de control de forma presentan un considerable nivel de consenso entre ellas.

FIGURA 039 Soluciones seleccionadas

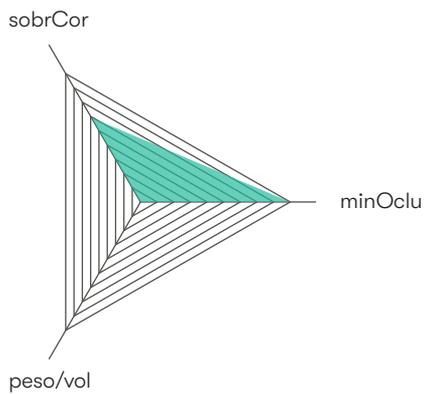




minOclu
Clasificación: 1 / 10
Valor de aptitud: 941.458333

peso/vol
Clasificación: 3 / 10
Valor de aptitud: 0.209522

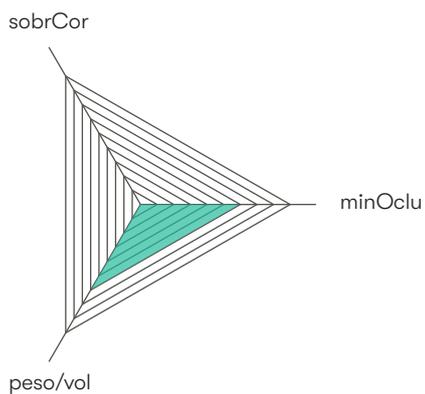
sobrCor
Clasificación: 10 / 10
Valor de aptitud: 1.673712



minOclu
Clasificación: 10 / 10
Valor de aptitud: 1139.722222

peso/vol
Clasificación: 0 / 10
Valor de aptitud: 0.190805

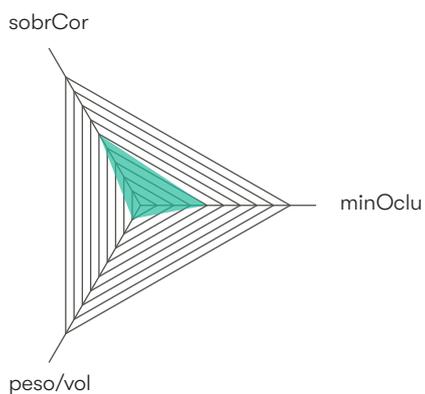
sobrCor
Clasificación: 7 / 10
Valor de aptitud: 0.665058



minOclu
Clasificación: 7 / 10
Valor de aptitud: 1070.652778

peso/vol
Clasificación: 7 / 10
Valor de aptitud: 0.226997

sobrCor
Clasificación: 0 / 10
Valor de aptitud: 0.443975



minOclu
Clasificación: 5 / 10
Valor de aptitud: 1068.513889

peso/vol
Clasificación: 2 / 10
Valor de aptitud: 0.197636

sobrCor
Clasificación: 6 / 10
Valor de aptitud: 0.609885

FIGURA 039
Soluciones válidas únicas con mejor rendimiento de acuerdo con los criterios mencionados

> Esta página ha sido dejada intencionalmente en blanco.

Capítulo 004

Documentación

El pabellón se proyecta como una serie de 19 módulos trapezoidales alrededor de un punto central dando la apariencia de una planta virtualmente circular, amparada por una cubierta conformada por faldones triangulares, producto de la variación de alturas y orientaciones de las cerchas que se apoyan sobre cada par de columnas y que a la vez delimitan y conectan los módulos de piso. En esencia, una plataforma ligeramente elevada del suelo que delimita un espacio permeable solamente interrumpido por los pilares de madera que sujetan la cubierta.

Planos arquitectónicos

FIGURA 040 Emplazamiento



FIGURA 041 Planta de cubiertas

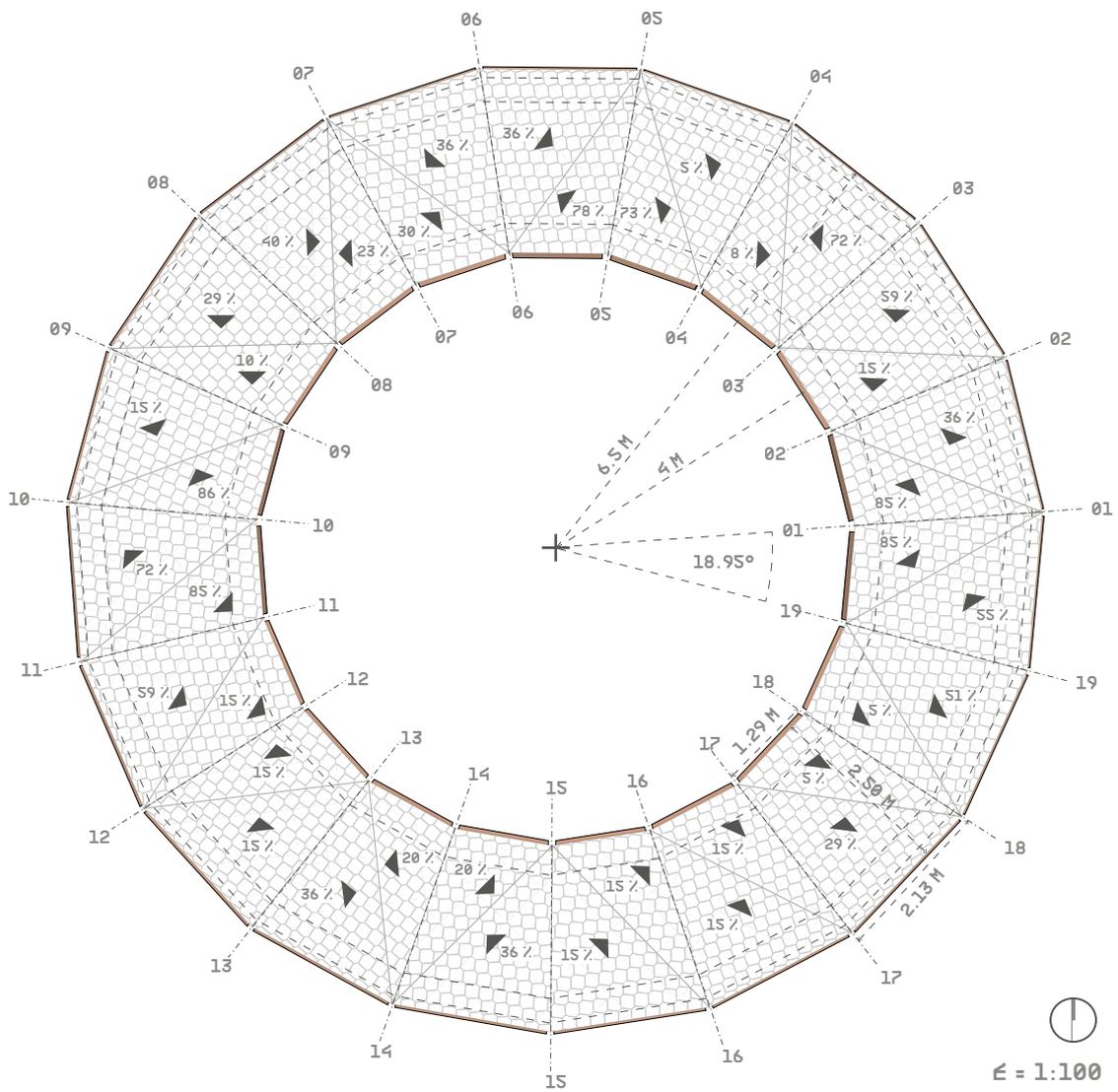


FIGURA 042 Planta de cimentación

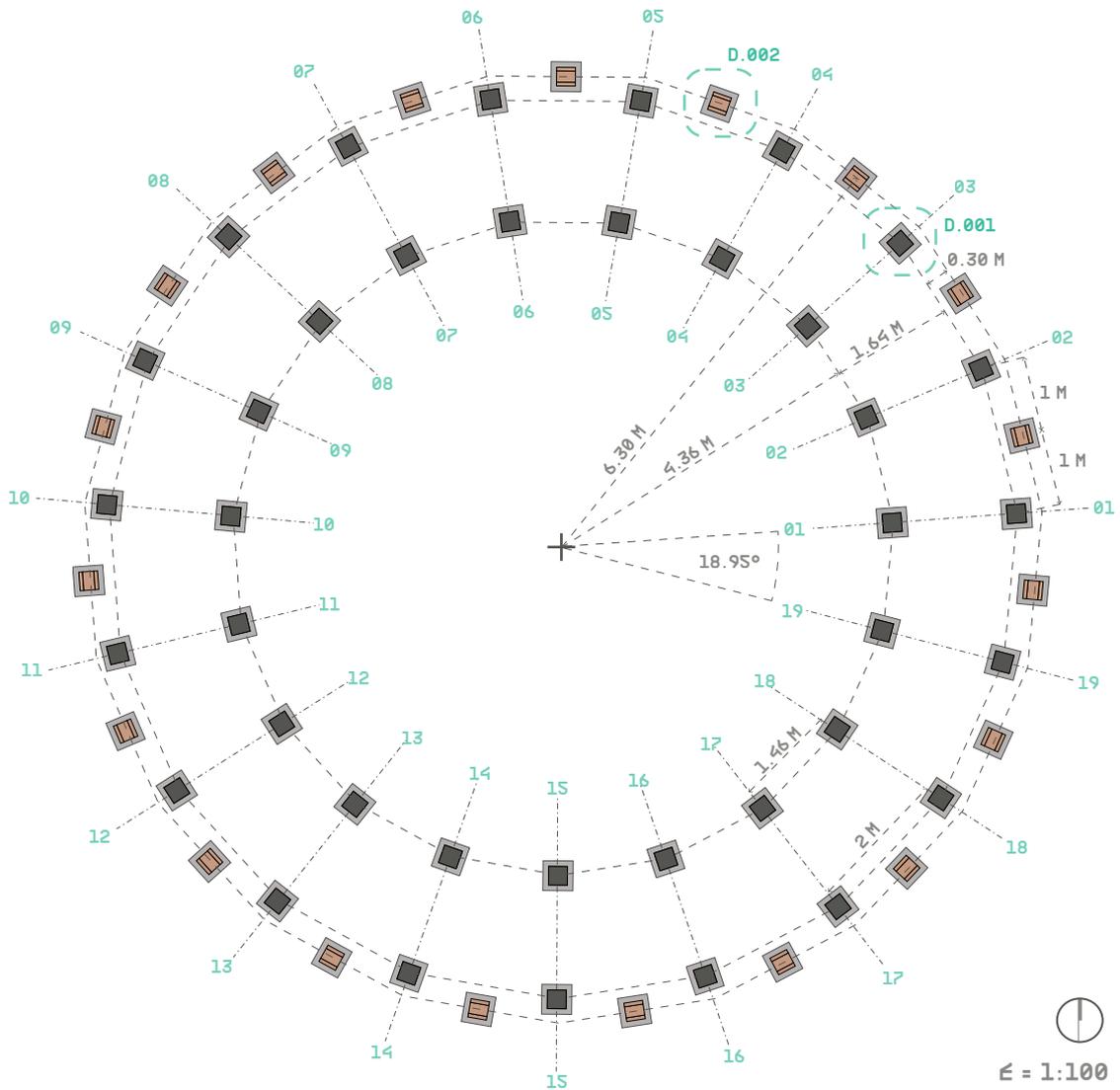


FIGURA 043 Planta de estructura de paneles de piso

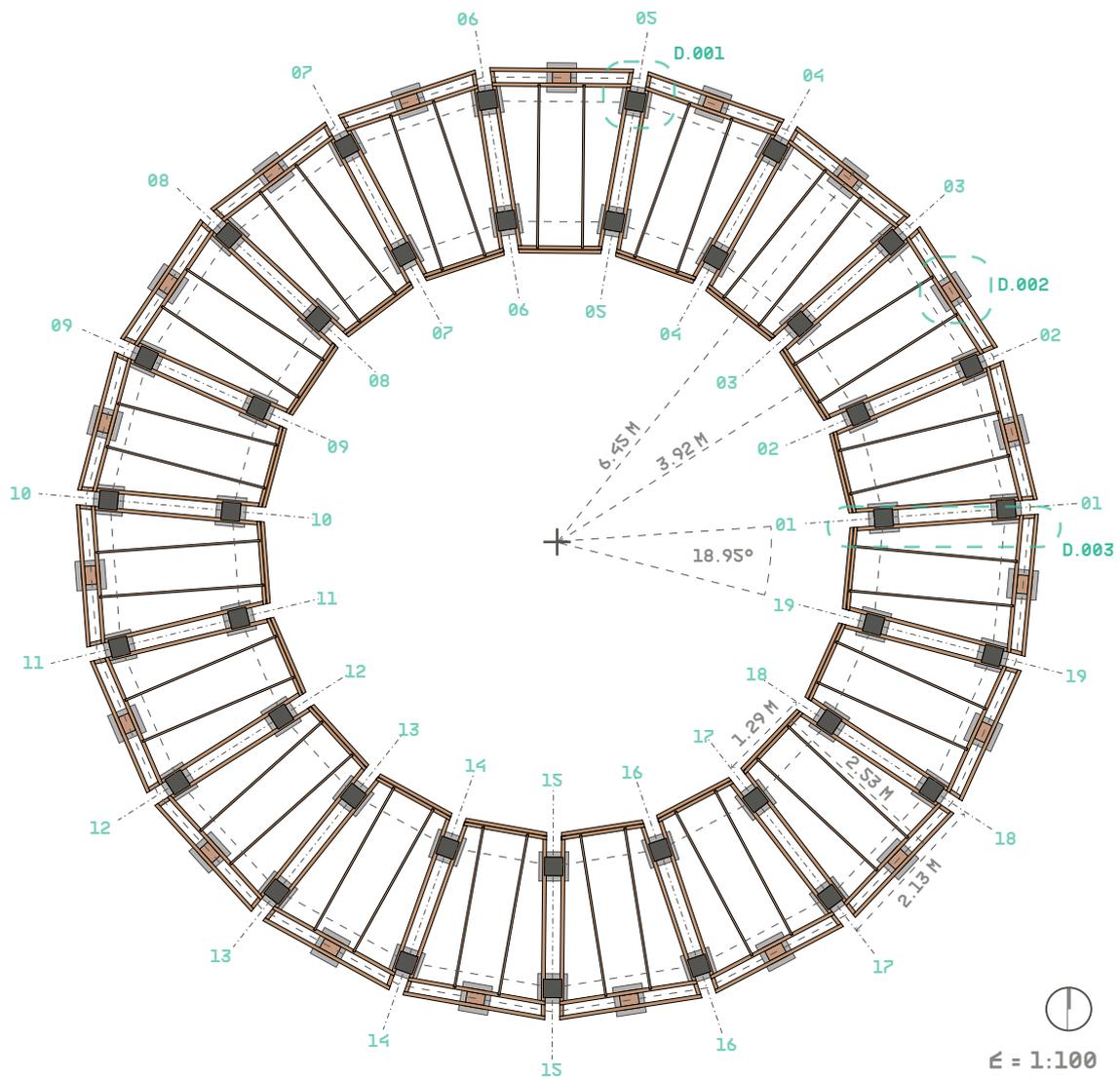


FIGURA 044 Planta

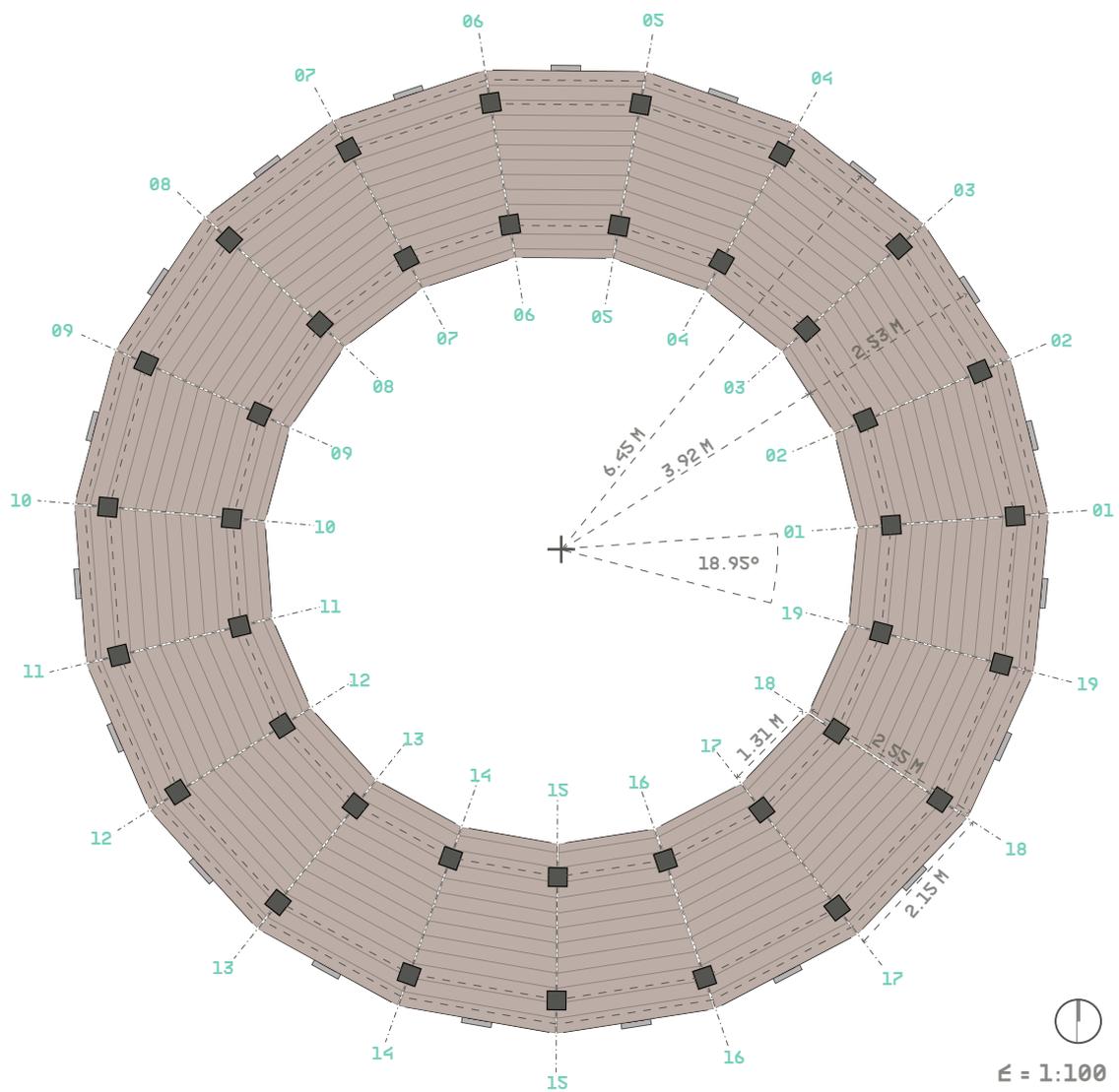


FIGURA 045 Planta de estructura de cubierta

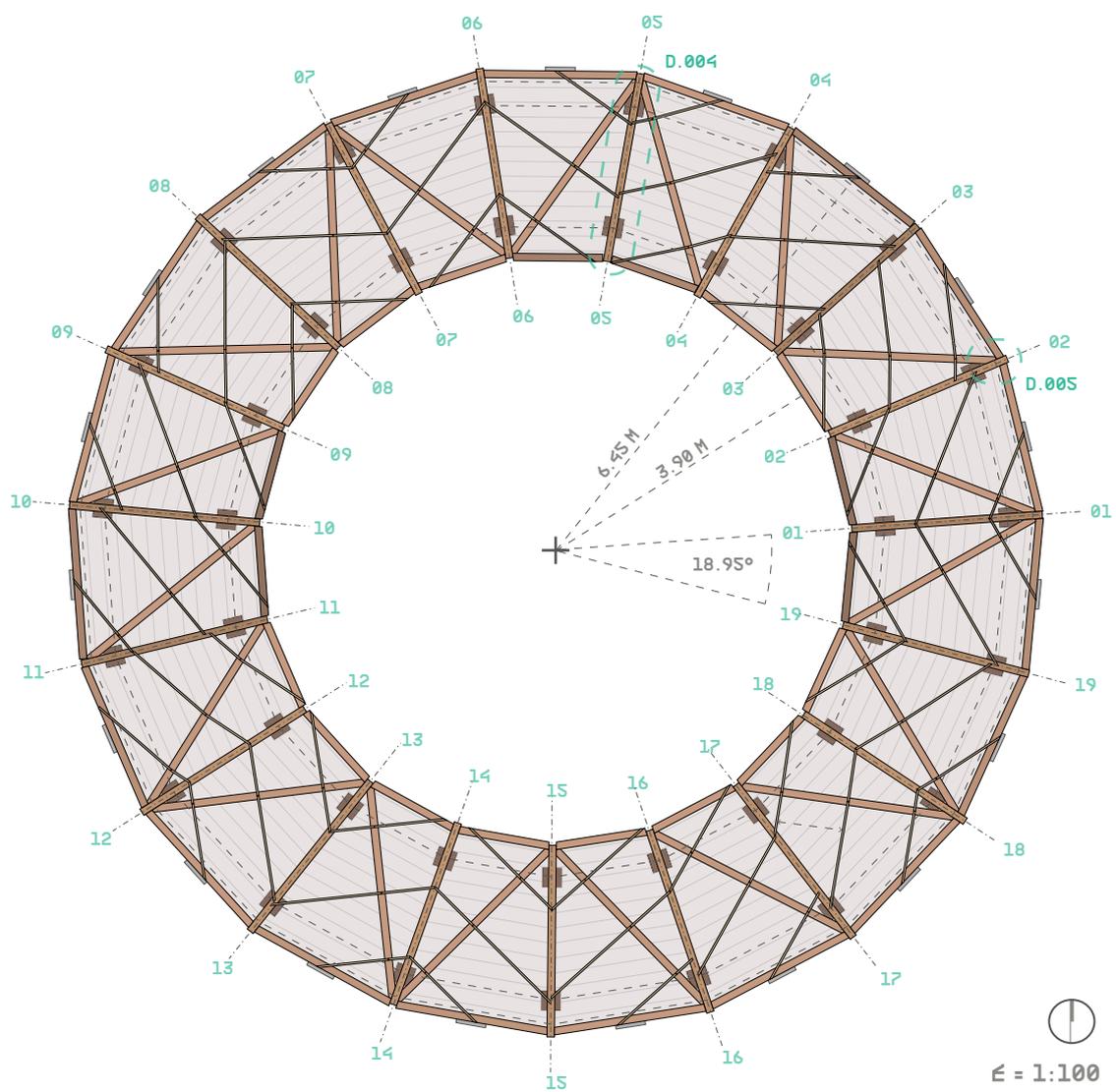


FIGURA 046 Vista frontal

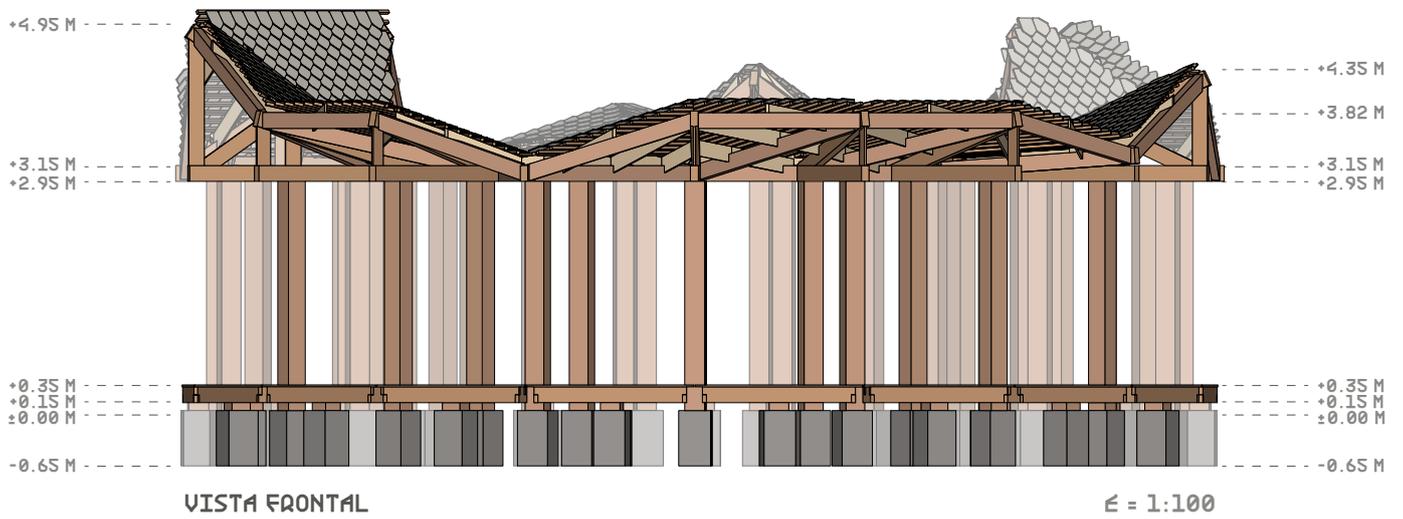


FIGURA 047 Vista lateral derecha

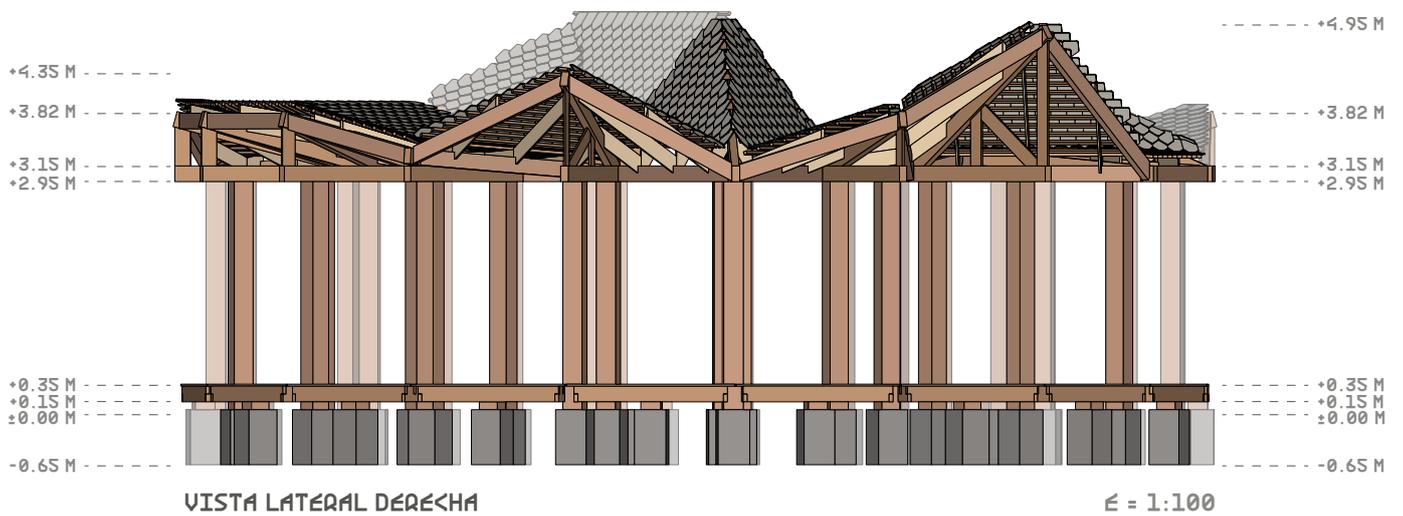


FIGURA 048 Vista lateral izquierda

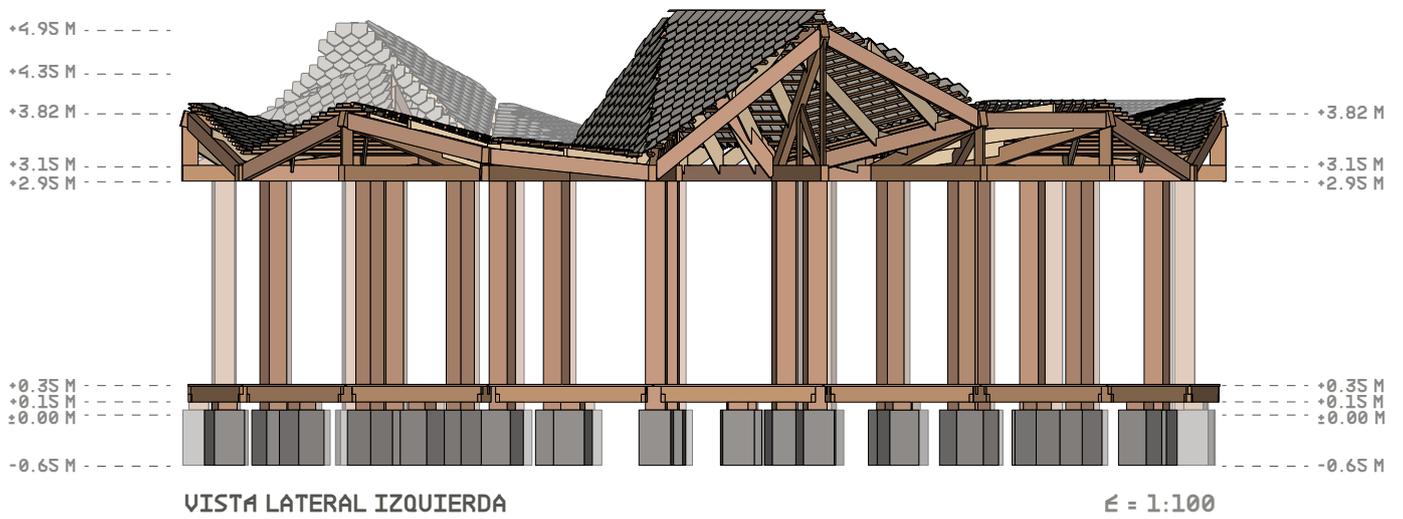
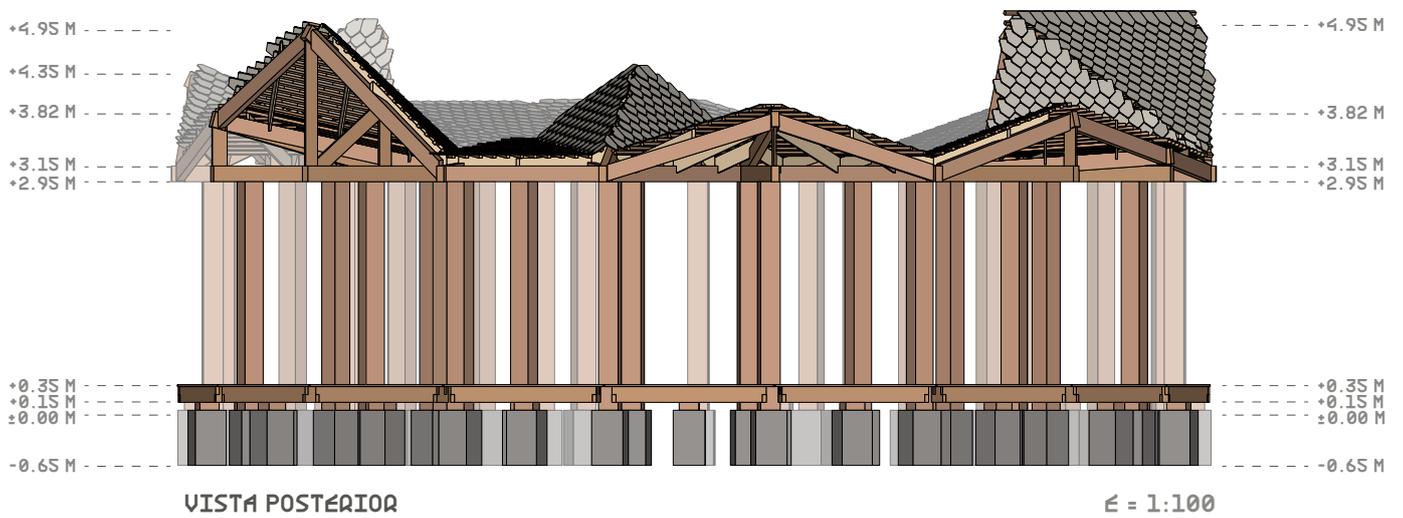


FIGURA 049 Vista posterior



Detalles constructivos

FIGURA 050 Detalle 001. Cimentación-Pilar principal

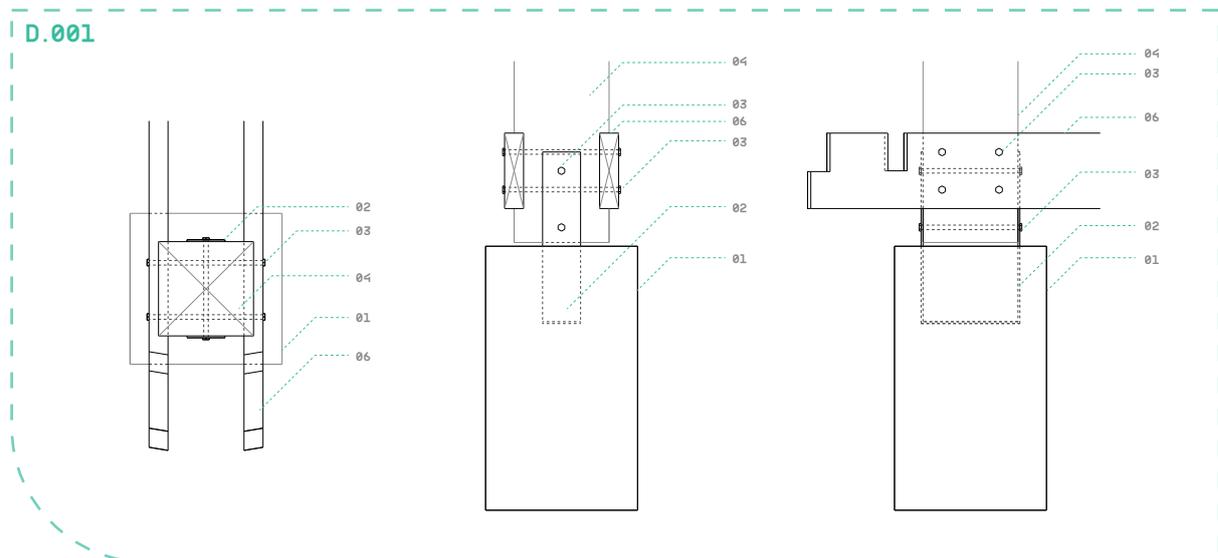


FIGURA 051 Detalle 002. Cimentación-Pilar de apoyo

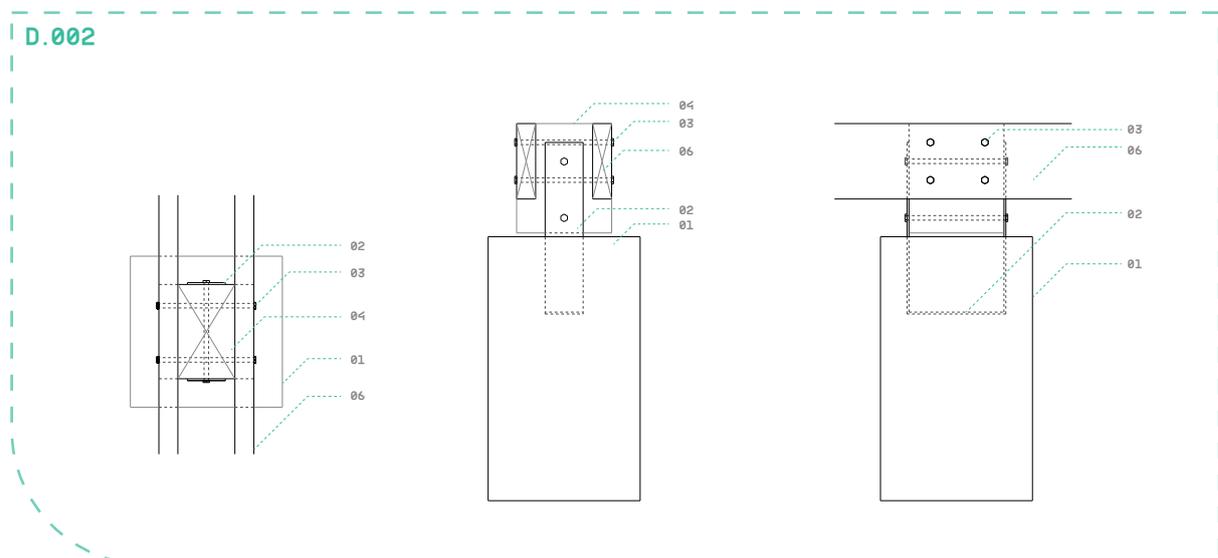
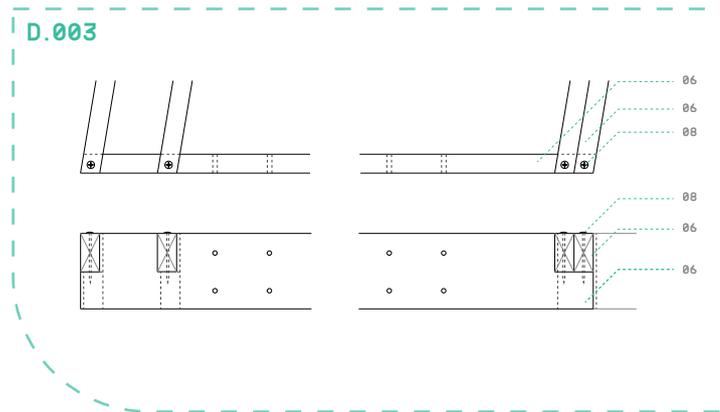


FIGURA 052 Detalle 003. Ensamble de módulo de piso



- 01.** Soporte de hormigón 400x400x600 mm
- 02.** Placa de anclaje e 5 mm
- 03.** Perno 1/2" con tuerca para unión de elementos estructurales
- 04.** Pilar de madera 250x250 mm
- 05.** Viga de madera 100x200 mm

FIGURA 053 Detalle 004. Ensamble de cercha y unión con pilar

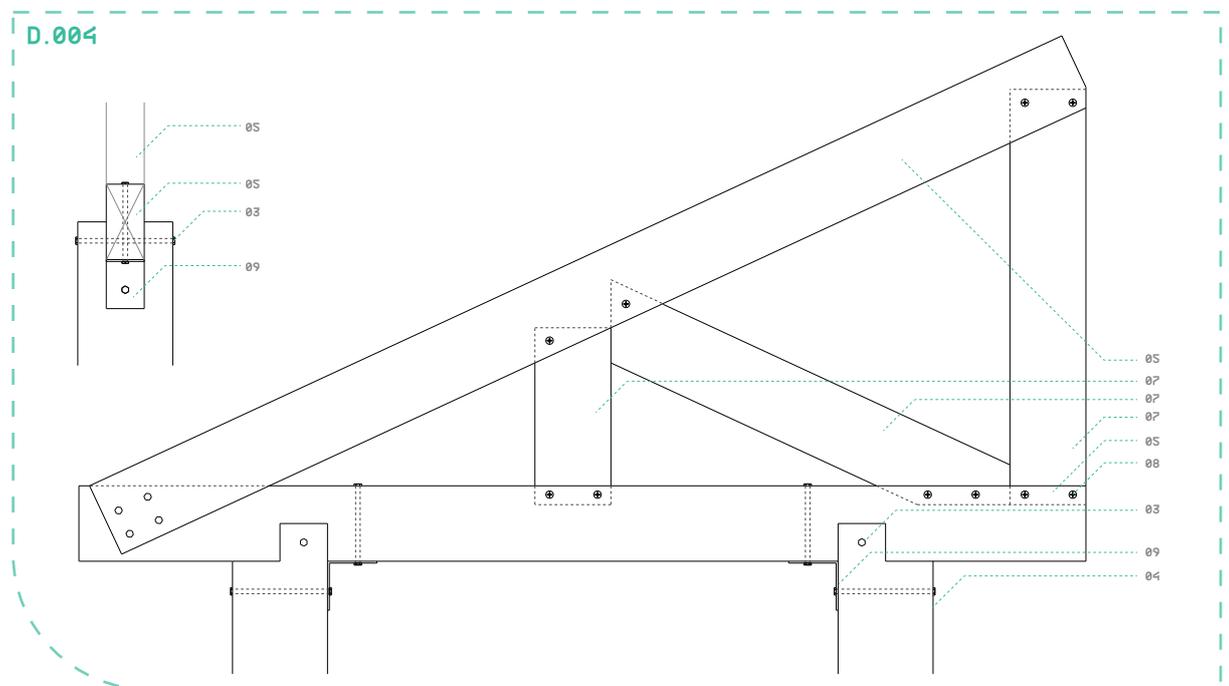
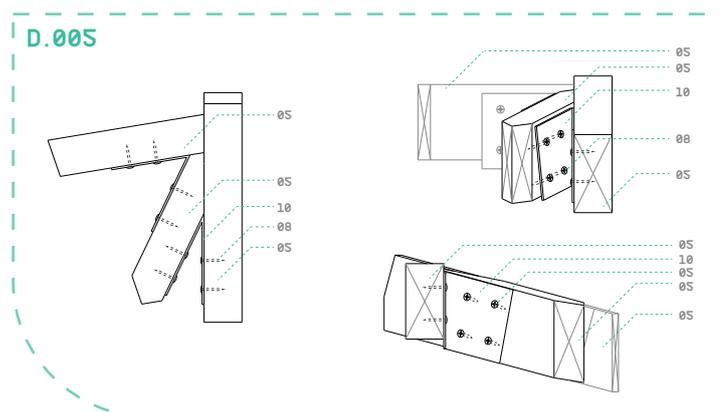


FIGURA 054 Detalle 005. Ensamble de encuentro entre elementos de cubierta



- 06.** Tablón de madera 50x200 mm
- 07.** Tabla de madera 25x200 mm
- 08.** Tornillo auto perforante de acero
- 09.** Ángulo metálico e 5 mm
- 10.** Placa metálica para anclaje de cubierta e 5 mm

Codificación de piezas

FIGURA 055 Piezas únicas

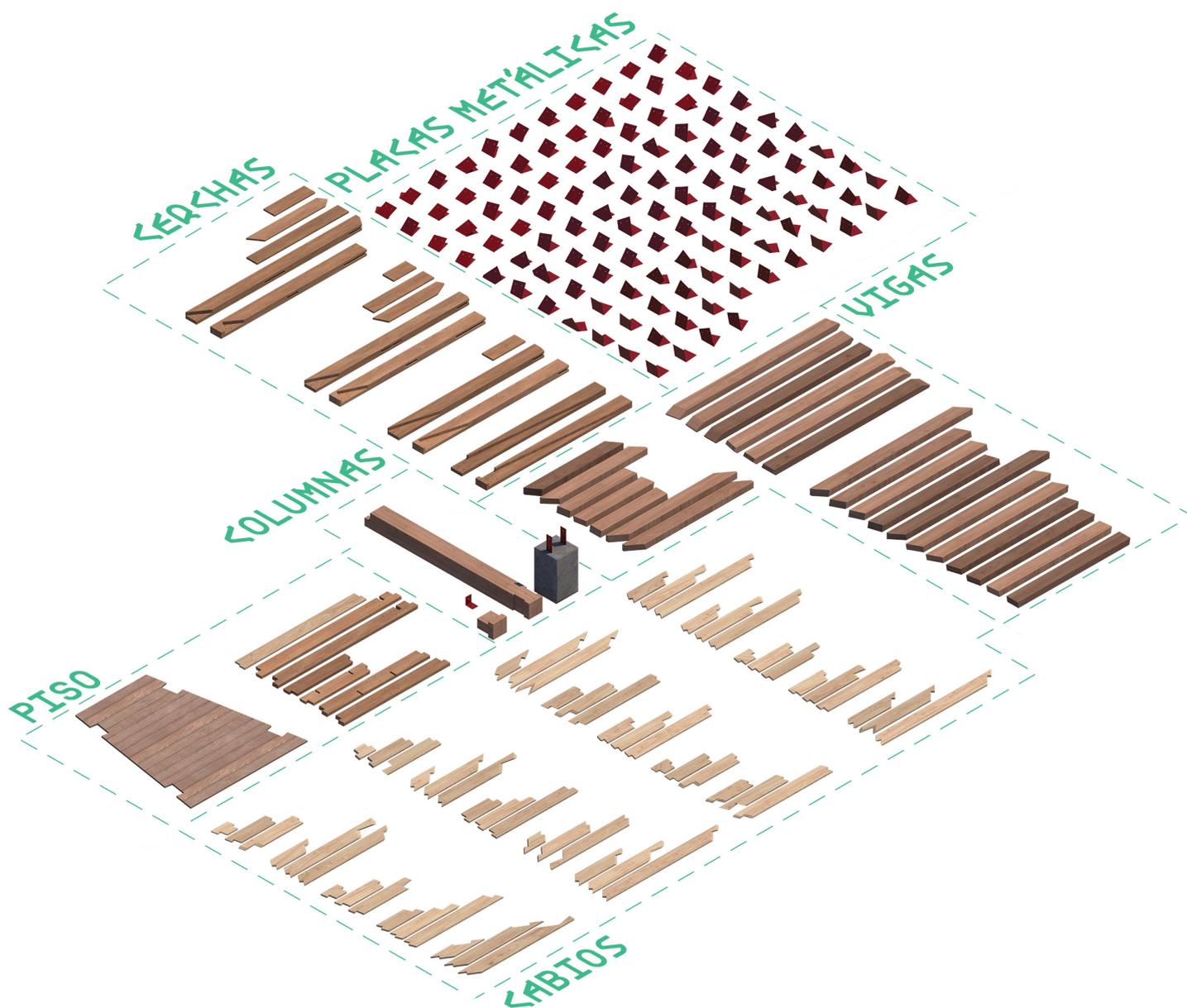


FIGURA 056 Elementos de cimentación y columnas, codificación y ubicación

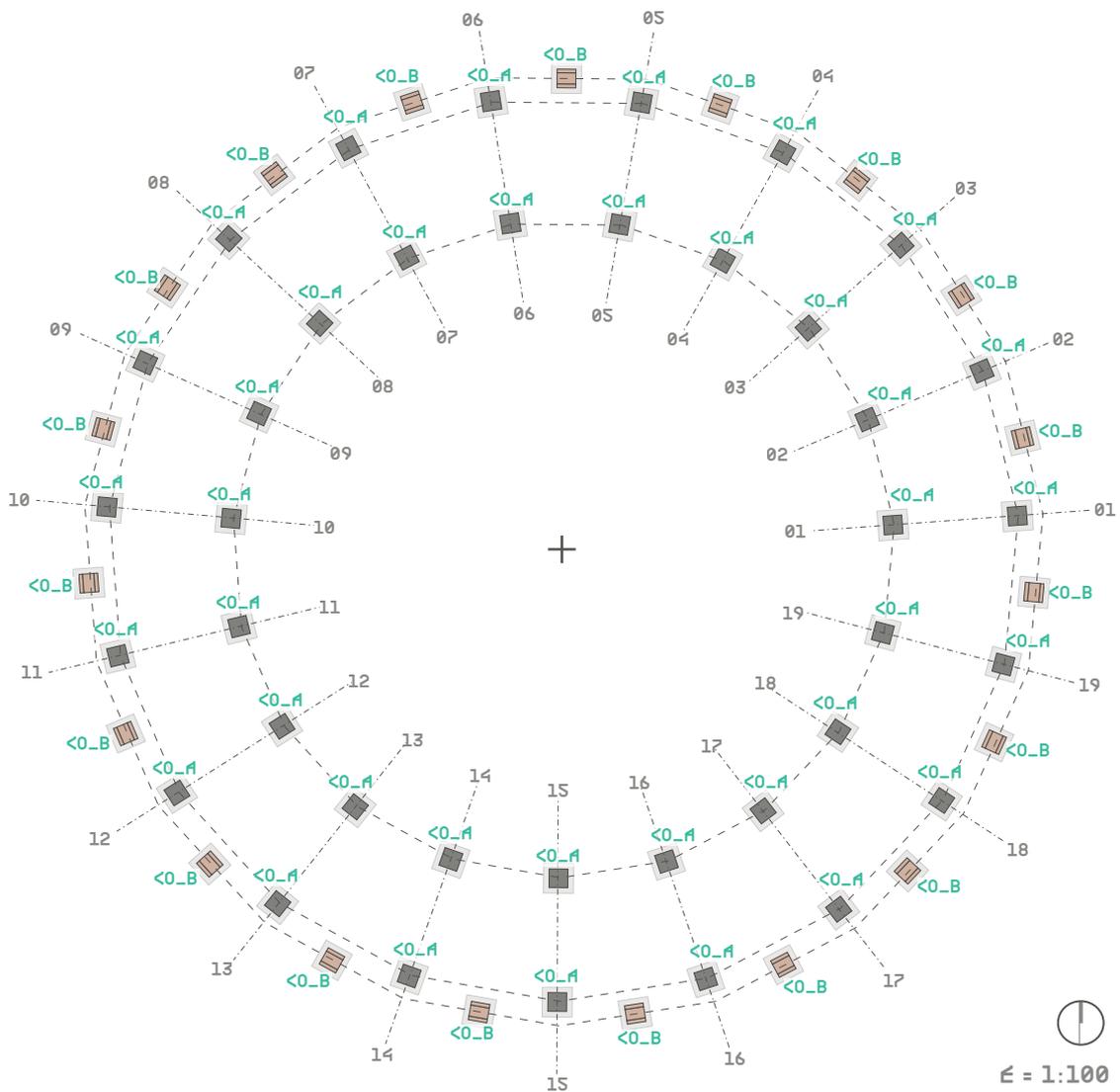
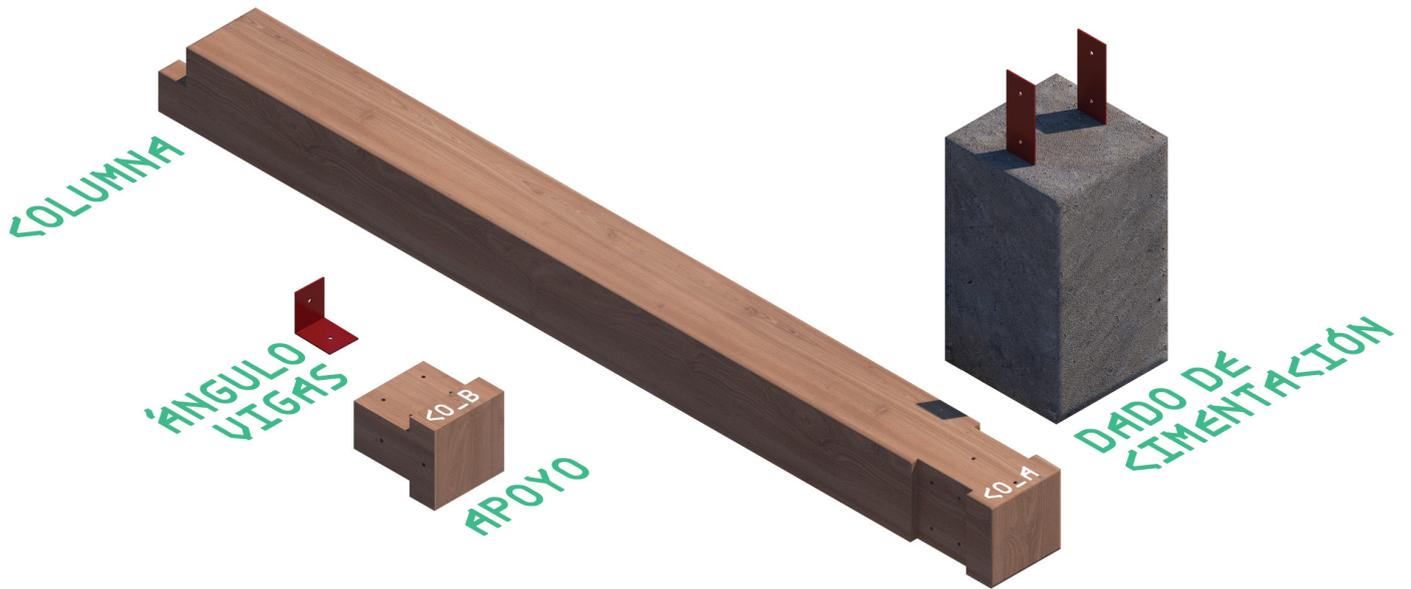


FIGURA 057 Elementos de panel de piso, codificación y ubicación

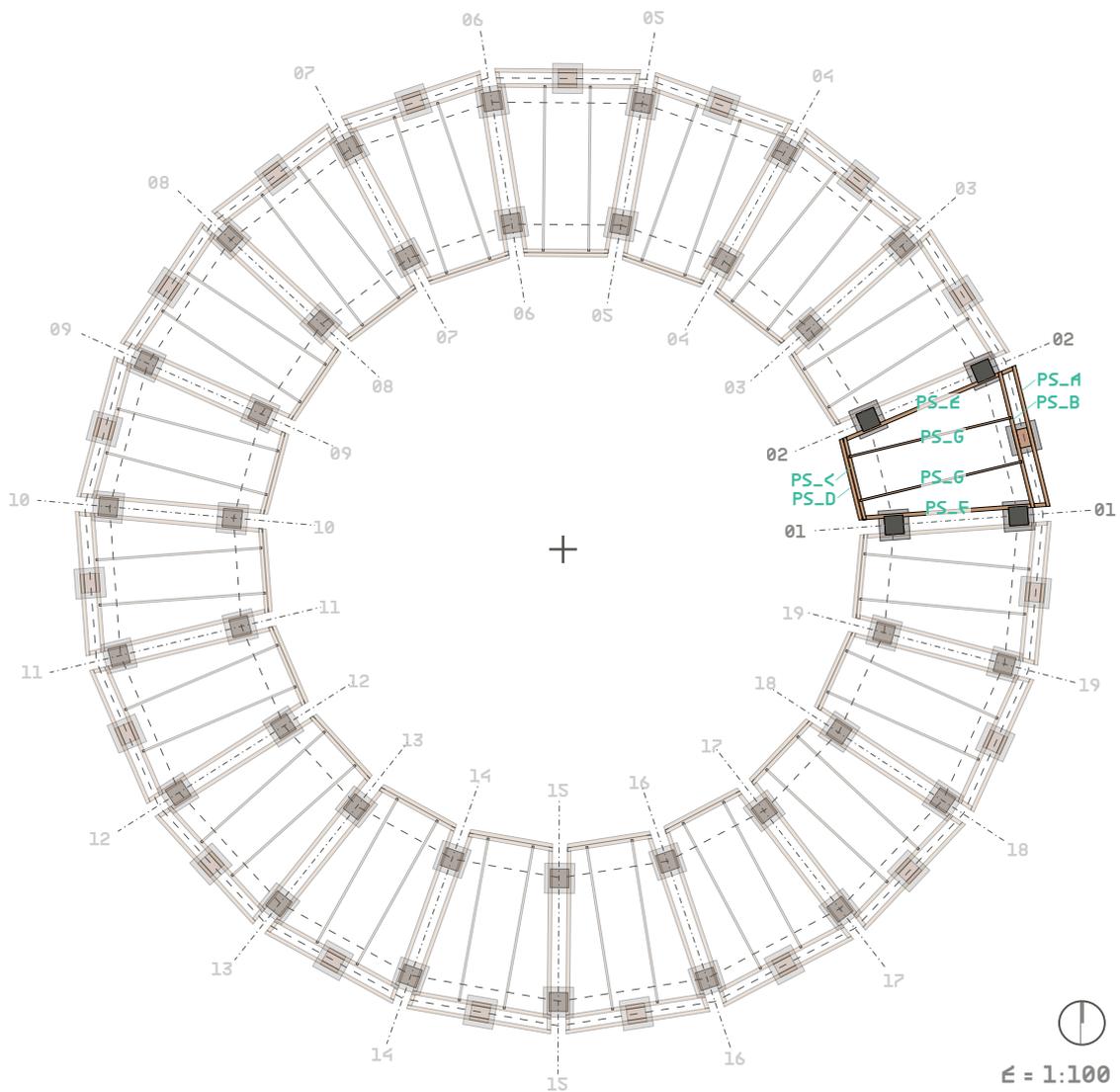


FIGURA 058 Elementos de cercha, codificación y ubicación

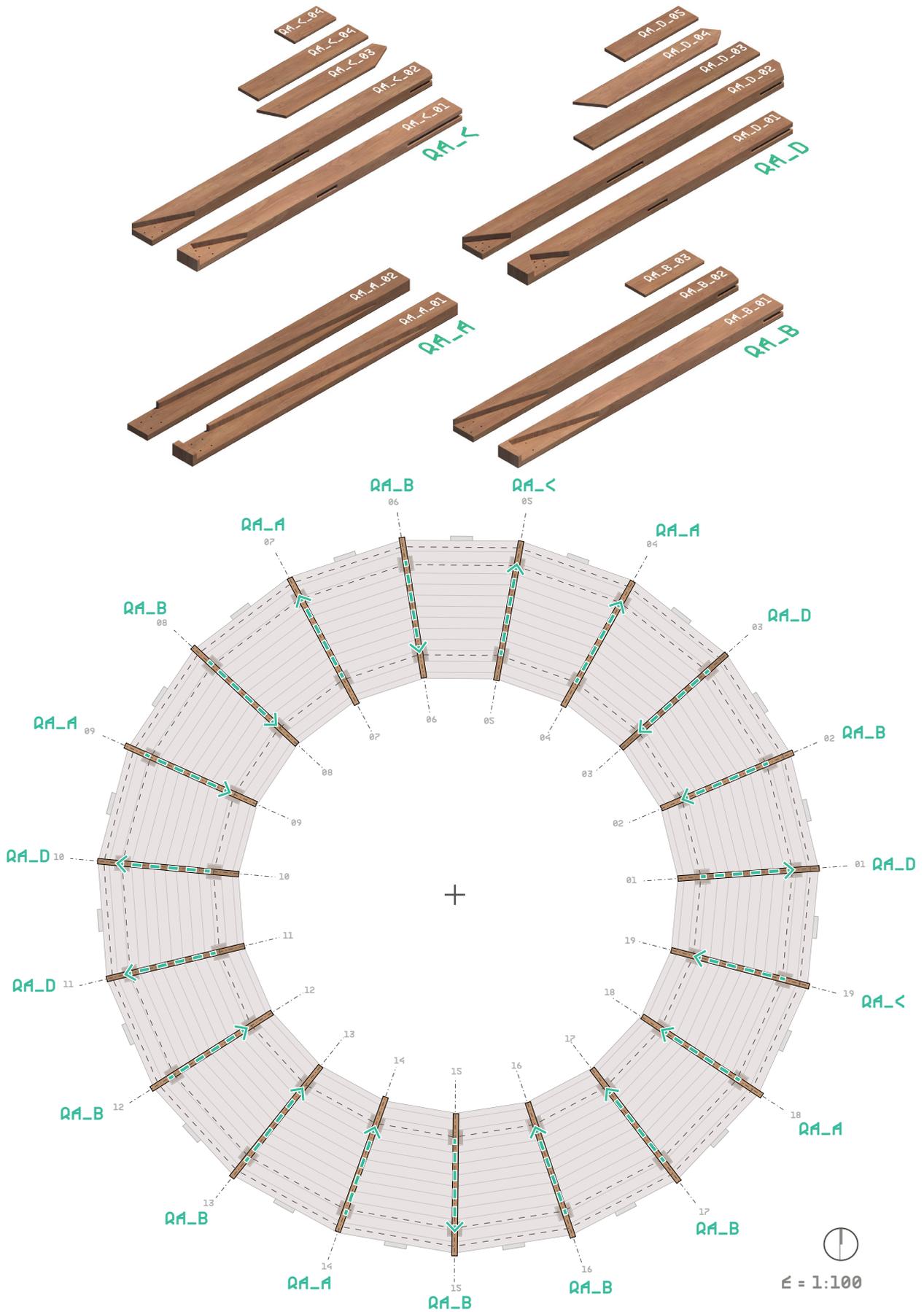
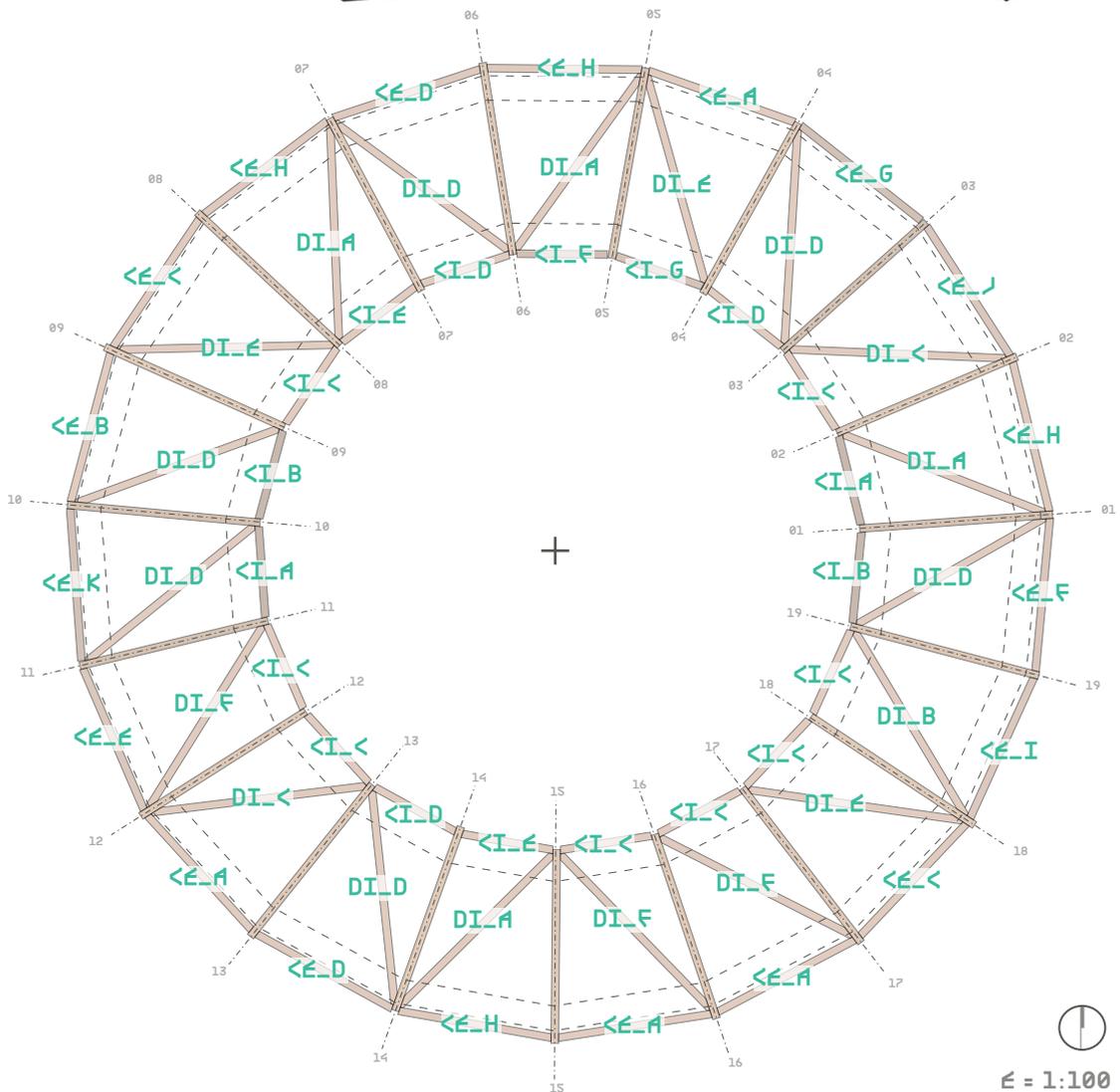
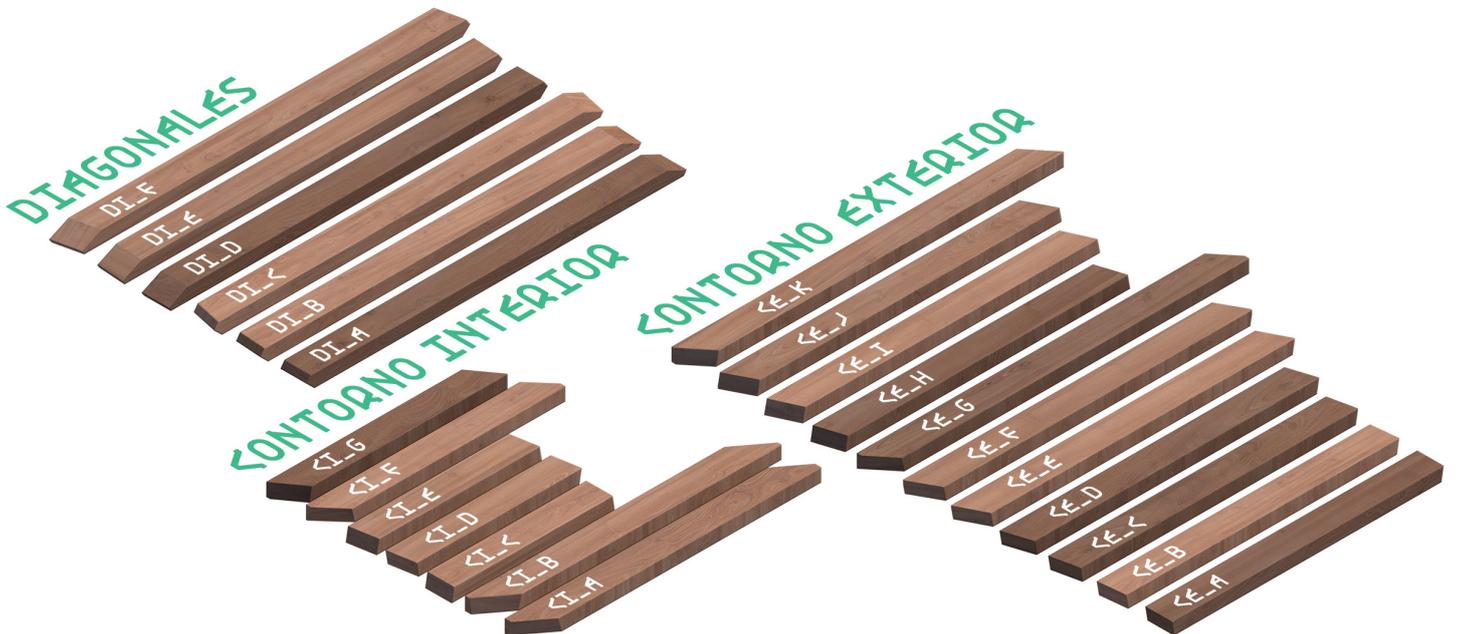


FIGURA 059 Vigas de cubierta, codificación y ubicación




 E = 1:100

FIGURA 060 Cabios, codificación y ubicación

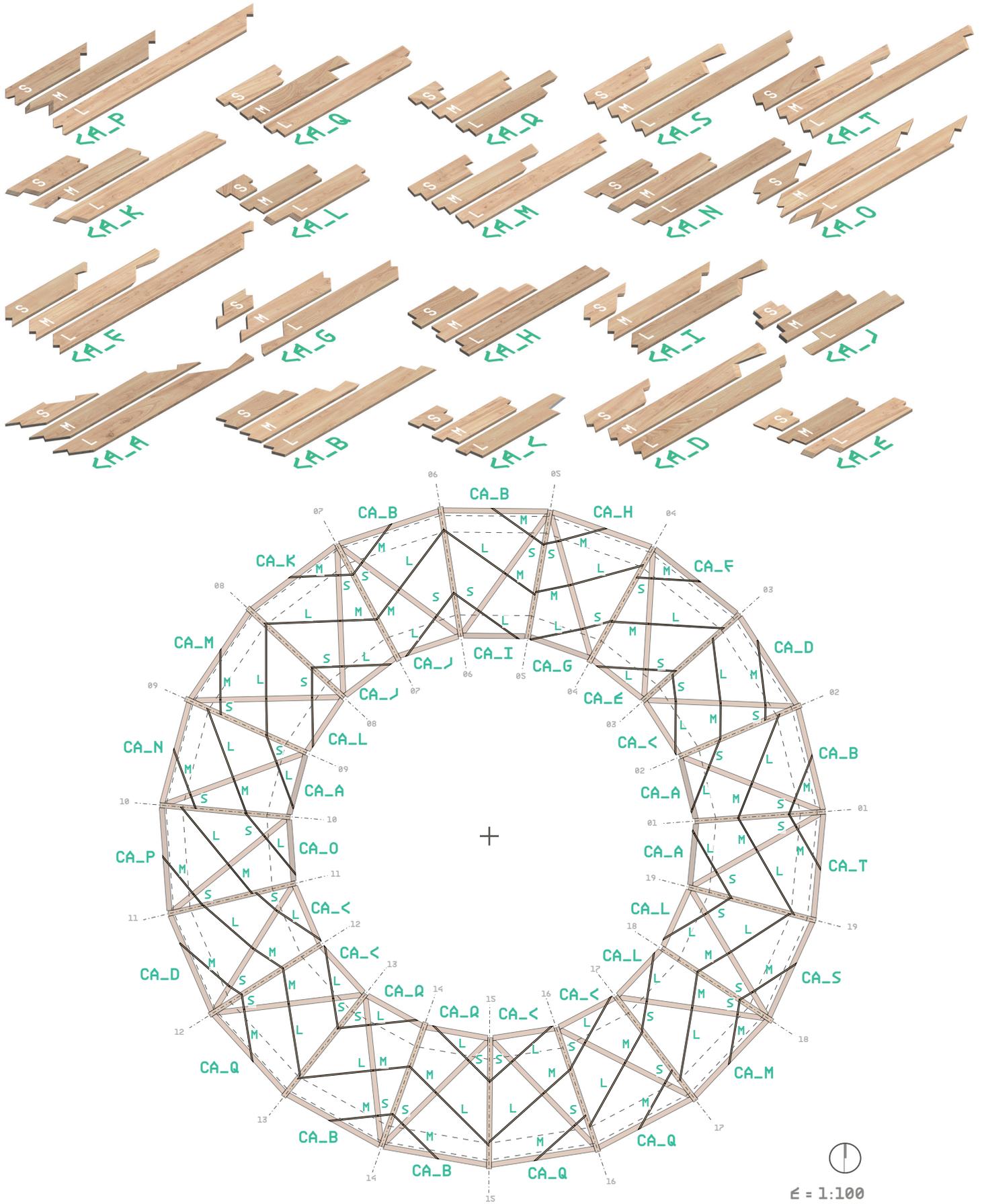


FIGURA 061 Placas metálicas para cubierta, codificación y ubicación

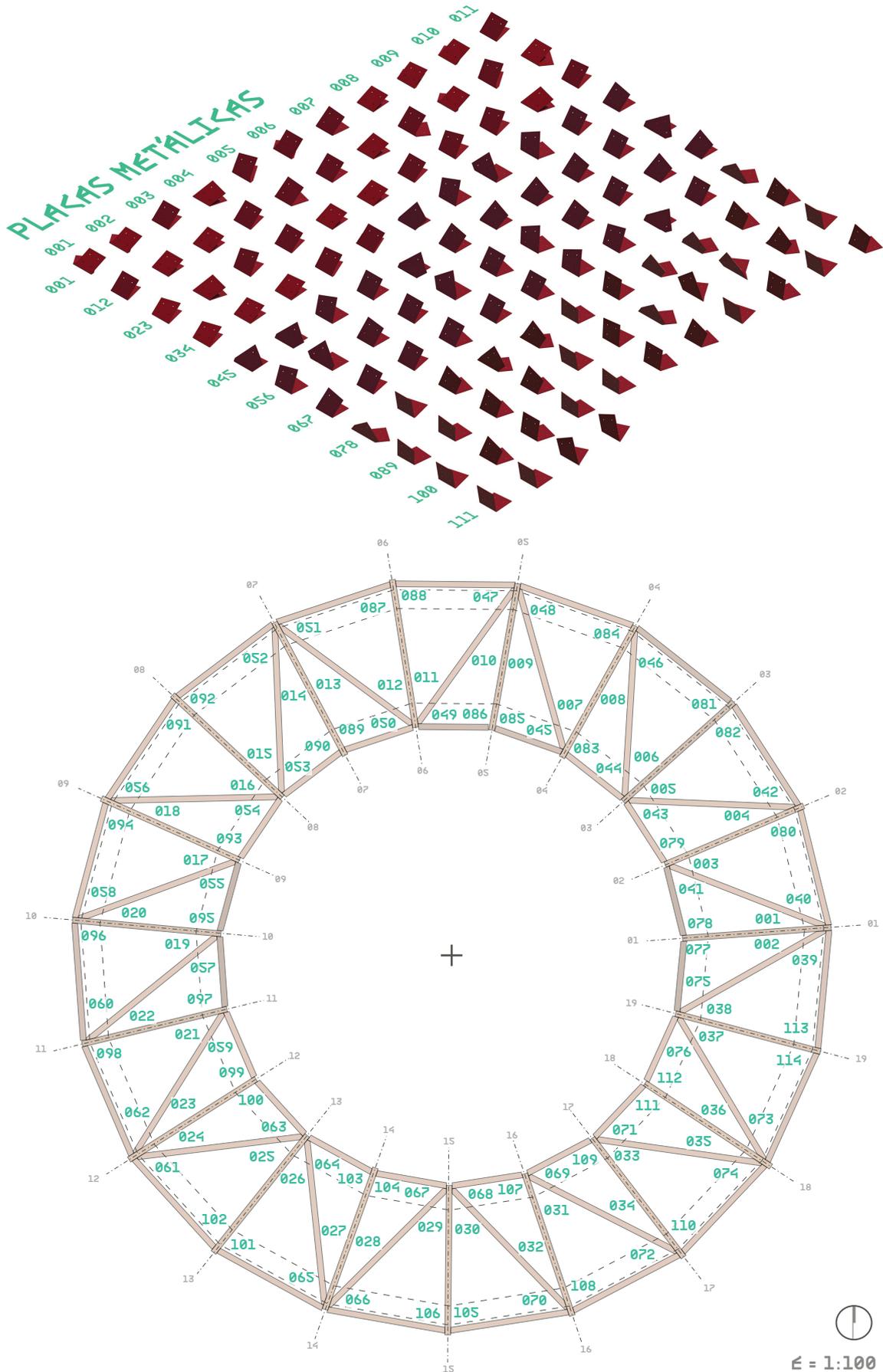


FIGURA 062 Axonometría explotada

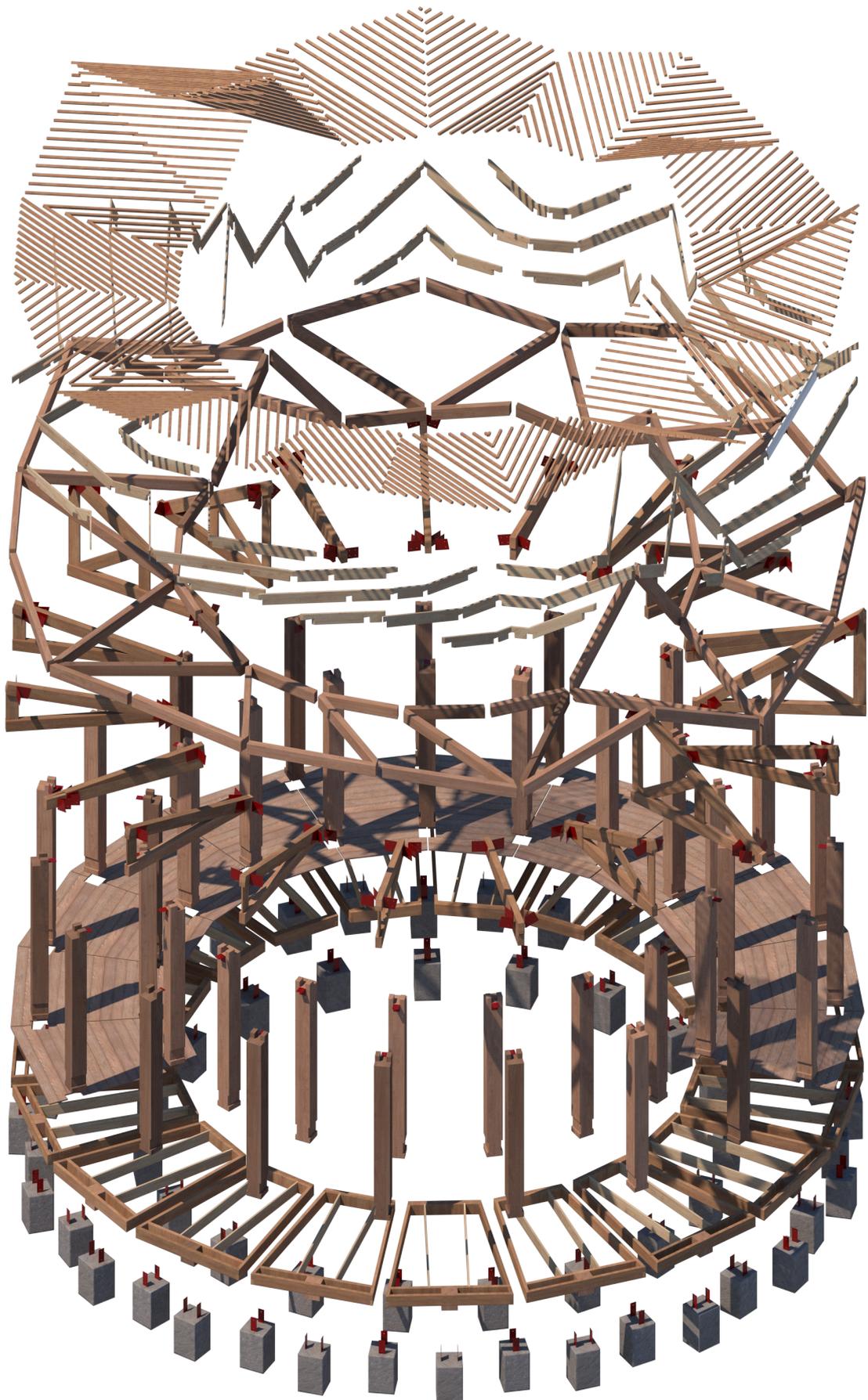
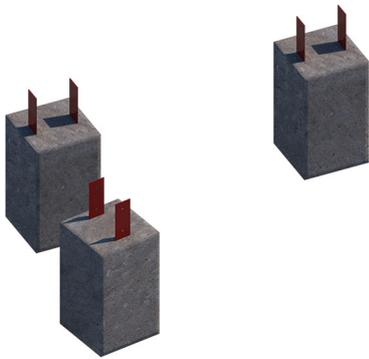


FIGURA 063 Secuencia constructiva módulo tipo

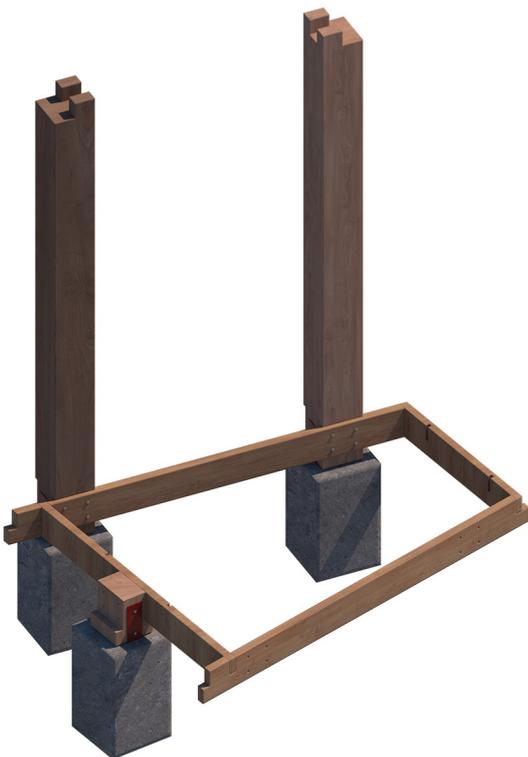
01



02



03



04



UCUENCA

05



06



07



08



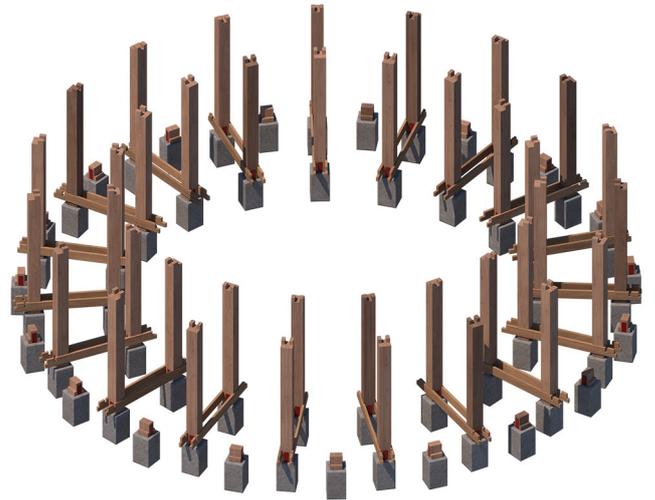
UCUENCA

FIGURA 064 Secuencia constructiva pabellón completo

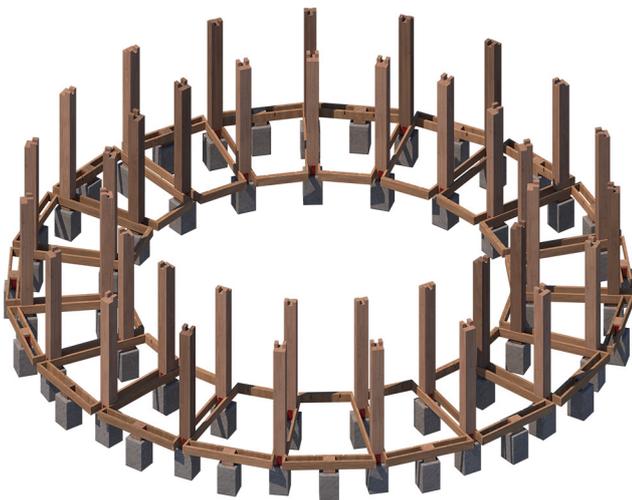
01



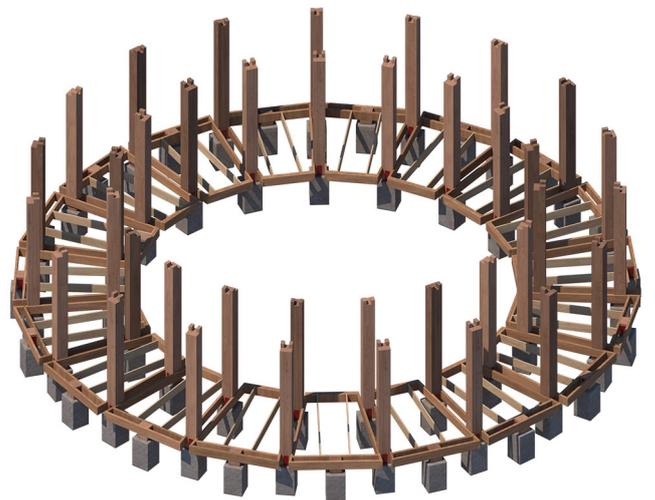
02



03



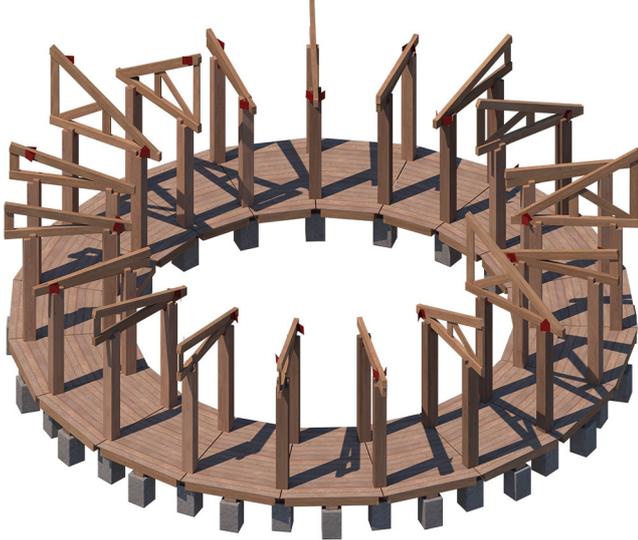
04



Proceso constructivo.- Una vez colocados los soportes de hormigón (tras un replanteo radial desde el centroide del pabellón) se empernan los pilares de madera a la cimentación gracias a las placas de anclaje (01). Posteriormente, se colocan las dos piezas centrales de los módulos de piso a los pilares (02) y sobre éstas se ensambla el resto de elementos que los componen (03 y 04). Las cerchas, previamente armadas, se colocan sobre los pilares (05) para construir los faldones de la cubierta gracias a las placas metálicas correspondientes (06). Finalmente, se colocan los cabios correspondientes a cada faldón (07) para solo restar la fijación de las correas (08) que soportarán las piezas cerámicas de remate de cubierta.

UCUENCA

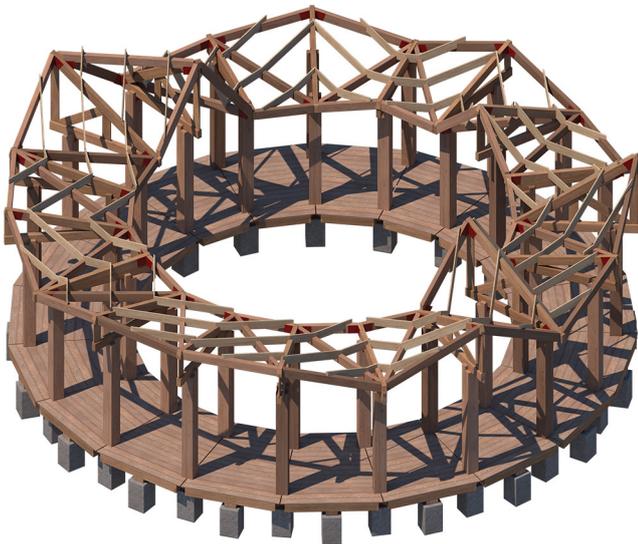
05



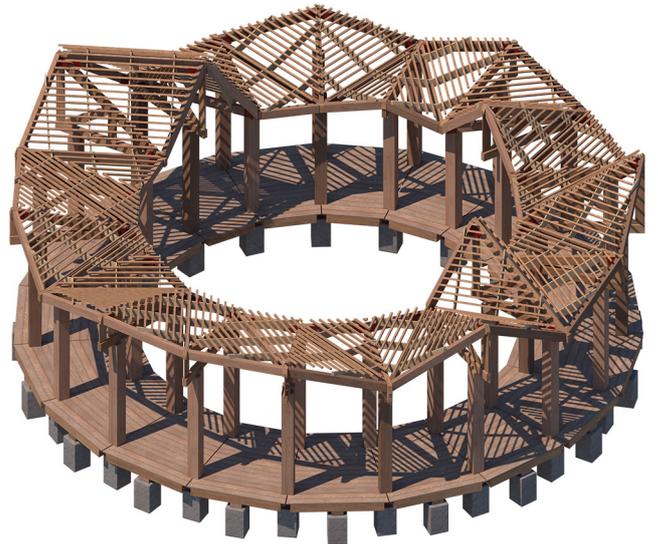
06



07



08



Visualización
arquitectónica

FIGURA 065 Fotomontaje arquitectónico





Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones Para sintetizar, al ser la investigación de carácter exploratorio, además de servir como un punto de arranque para futuras investigaciones debido al trabajo de recopilación de información sobre el método de optimización multi-objetivo, también representa un **bosquejo** válido sobre un problema de diseño arquitectónico genérico en nuestro **contexto** ya que considera, en cierta medida, a los materiales disponibles, normativa estructural local y características del sitio. Dicho esto, se exponen las conclusiones relativas a los resultados de la simulación, la metodología utilizada y el desarrollo del esquema:

01. Dado que la simulación produjo **58 soluciones** que superan las restricciones, de un total de 5000 individuos analizados, se obtuvo un **1.16% de soluciones válidas**. Evidentemente, el esquema se demuestra capaz de producir soluciones aplicables pero, dado que no se encontraron datos referenciales en la bibliografía examinada con los que comparar el porcentaje obtenido, no es posible juzgar si esta cantidad es apropiada para determinar que se exploró un área significativa del espacio de diseño correspondiente a las soluciones relevantes para la investigación.

02. Ya que el porcentaje exacto de las soluciones válidas dentro del espacio de diseño solo sería descubierto al analizar todas y cada una de las combinaciones de variables, resulta irracional intentar descubrir una única solución óptima, global y definitiva al problema de diseño: se desvirtuaría completamente el propósito del uso de los algoritmos genéticos. Además, al trabajar con un esquema de diseño multidisciplinar para dar solución a un problema arquitectónico complejo, el espacio de diseño alcanza una magnitud colosal, dificultando exponencialmente esta utópica tarea. De ahí la importancia de la **continuidad** dentro del espacio de diseño para obtener resultados satisfactorios sin recurrir a una población de tamaño excesivo.

03. Aunque se implementaron estrategias para penalizar las soluciones que no cumplen con al menos una de las tres restricciones, el número de soluciones válidas no se vio incrementado durante el progreso de la simulación (Tabla 004), sino **oscilaba entre 0 y 2** (por generación); lo que corresponde a un máximo de **4% de soluciones válidas por generación**. Entonces, dado que la cantidad de soluciones válidas por generación no

aumenta progresivamente, se demuestra que las estrategias aplicadas para rectificar las soluciones, que en un principio eran inválidas, no logran ser del todo suficientes. Cabe aclarar que esta intermitencia irregular de la validez de las soluciones también se debe en mayor o menor medida al **factor de aleatoriedad** en los procesos de cruce y mutación (pág. 041), componentes del proceso genético que el método trata de emular.

04. Al analizar las diferencias entre las variables del conjunto de soluciones válidas, se encontró que muchas de ellas proponían idénticas configuraciones; como resultado, se identificaron **10 grupos de soluciones únicas**, lo que representa tan solo un **0.2 % de la población total**. Por una parte, dado que éstas soluciones únicas no muestran diferencias sustanciales de su forma entre sí, es posible exponer que cualquiera de ellas es representativa de las todas las soluciones válidas analizadas en la simulación; por otra, esto no implica que cualquier configuración de la población inicial eventualmente derivará en un conjunto de soluciones viables similar al encontrado en la simulación expuesta. Es decir, cabe la posibilidad de que existan soluciones radicalmente distintas con similares o incluso mejores rendimientos debido a la complejidad del esquema, la magnitud del espacio de diseño y la aleatoriedad inherente a ciertos aspectos del método de diseño generativo.

05. Dado que el **79.31%** de todo el conjunto de soluciones válidas encontradas corresponden a la primera mitad de la simulación, se evidencia que existe un margen de mejora en las estrategias aplicadas para contener la influencia de la optimización de rendimientos y producir una cantidad de información mayor con la que realizar una evaluación más exhaustiva de las soluciones válidas.

06. La distribución de las soluciones válidas en los grupos únicos presenta, generalmente, un distintivo patrón de acuerdo con su número de generación; es decir, las soluciones válidas que pertenecen a una misma o similar generación muestran una idéntica configuración de sus variables (Tabla 004). Esta apreciación podría indicar que el planteamiento de las restricciones y las estrategias de limitación generan una desatención de la exploración del espacio de diseño en pro de una mayor explotación, que parece conducir las soluciones válidas hacia propuestas similares.

07. Al analizar la Tabla 006, se aprecia un nivel sustancial de consenso en algunas de las variables de las soluciones únicas: el **ancho** es de **5 m** en todas las soluciones, el **radio** del pabellón es predominantemente de **13 m** y el **número de lados** está acotado **entre 18 y 20**, por ejemplo. Cabe mencionar que la configuración de la cubierta no es igual entre todas las soluciones únicas debido a que la mejora de rendimiento que esto supondría en el objetivo ‘minimizar oclusiones’ es desestimada en pro de los dos objetivos restantes.

08. Es razonable aceptar que es posible encontrar una solución válida a través de un simple, aunque lento, ineficiente y tedioso proceso de ajuste manual de variables; considerando además que ya contamos con el esquema parametrizado, es decir, responde y actualiza los resultados automáticamente al más mínimo cambio. Sin embargo, en la presente investigación, difícilmente podríamos afirmar que el conjunto de soluciones más aptas podría haberse intuido, debido a la complejidad que supone la cantidad de objetivos de optimización, variables y procesos de cálculo complejos (pág. 035) que componen todo el esquema realizado.

Finalmente, aunque la solución generada al problema de diseño arquitectónico propuesto, a través del diseño computacional generativo, es ya de por sí una conclusión satisfactoria, el valor real de la investigación reside en exponer los métodos computacionales en nuestro contexto, esclarecer cuál es el rol del arquitecto dentro de él y, a lo mejor, incitar a futuros estudiantes a realizar investigaciones más exhaustivas y específicas que combinen la práctica arquitectónica tradicional con herramientas de diseño computacional.

Recomendaciones

01. Como se mencionó en “Manejo de restricciones” (pág. 037), la presente investigación no atiende íntegramente al aspecto del estudio estructural del pabellón debido a que solamente fue proyectado al grado de permitir demostrar la inclusión de las ingenierías dentro del método de optimización de diseño multidisciplinar (MDO), además de la complejidad de la tarea y la carga computacional agregada que supondría; por lo tanto, se recomienda, en futuras investigaciones, formular un **estudio estructural exhaustivo** como un objetivo principal de optimización y su aplicación práctica en nuestro contexto.

02. De igual manera, el componente de acondicionamiento ambiental, únicamente tratado en esta investigación como un análisis de sombreado, solamente representa una parte de lo que supondría un estudio climático significativo. Por ende, se recomienda, en futuras investigaciones, investigar la **optimización del rendimiento ambiental** de un problema de diseño arquitectónico con herramientas de **diseño computacional generativo**, de una manera exhaustiva junto con otros indicadores relevantes a nuestro contexto.

03. Se pudo verificar, en cierto grado, la complejidad de **combinar** la optimización y la exploración de la forma (como exponía Fasoulaki) en un sistema de optimización multidisciplinar, no sólo en la dificultad para afinar el esquema de diseño para producir soluciones válidas, sino también en la concepción misma del esquema. Dicho esto, se recomienda, en futuras investigaciones, **analizar** el número de resultados válidos y la practicidad del **método combinado** en contraste con un sistema que resuelva primero la **exploración de forma** y, posteriormente, la **optimización** del modelo, en el contexto de un problema de diseño arquitectónico.

04. Aunque existe un sistema integrado en Wallacei para recalcular las soluciones nulas, o inválidas de acuerdo con nuestros criterios, el método sugerido es invertir mayor cantidad de recursos en ajustar el rango de las variables y los objetivos de optimización de forma que se inclinen hacia el rango de valores que nos interese, ya que un desarrollo deficiente de estos aspectos provocará un tiempo de procesamiento inabordable. Se recomienda, en futuras investigaciones, desarrollar y contrastar un método para aplicar restricciones de diseño, en un problema arquitectónico, con mayor eficacia dentro del método de diseño computacional generativo multidisciplinar para incrementar la proporción de soluciones válidas únicas.

05. Por último, a la academia, implementar metodologías de enseñanza para unificar las herramientas digitales que ya se enseñan, por separado, dentro de un entorno de trabajo que permita al estudiante observar y comprender las relaciones subyacentes entre las múltiples disciplinas que componen el proyecto arquitectónico y/o urbano.

Bibliografía y anexos

- Bibliografía**
- Alexander, C. (1980). *Tres Aspectos de Matemática y Diseño: La estructura del medio ambiente* (Beatriz de Moura, Trad.) (2da ed.). Tusquets Editores.
 - Dong, A., Moere, A., Gero, J. (Ed.). (2007). *Computer-Aided Architectural Design Futures 2007*. Springer.
 - Mitchell, W. (2001). Roll Over Euclid: How Frank Gehry Designs and Builds. En Ragheb, J. (Ed.), *Frank Gehry, Architect* (352-363). Guggenheim Museum Publications.
 - Schumacher, P. (14 de septiembre-23 de noviembre de 2008). *Parametricism as Style – Parametricist Manifesto*. 11º Bienal de Arquitectura de Venecia, Italia.
 - Sainz, J. (1992). *Infografía y arquitectura: dibujo y proyecto asistido por ordenador*. Nerea.
 - Aguirre, S. (2015). Procesos generativos de diseño. Diseño Generativo, el computador como instrumento de creación. *Actas de Diseño* (19), 147-150.
 - Kolarevic, B. (Ed.). (2003). *Architecture in the Digital Age. Design and Manufacturing*. Spon Press.
 - Frazer, J. (1995). *An Evolutionary Architecture*. Architectural Association Press.
 - Jabi, W. (2013). *Parametric Design for Architecture*. Laurence King.
 - Roudavski, S., Walsh, A. (2011). The Headspace project: Computer-assisted fabrication as an introduction to digital architectural design. *Circuit Bending, Breaking and Mending: Proceedings of the 16th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia*, 579-588.
 - Frazer, J., Janssen, P. (2003). Generative and Evolutionary Models for Design. *Communication & Cognition* (36), 187-215.
 - Krish, S. (2010). A practical generative design method. *Computer-Aided Design* (43), 88-100.
 - Goldberg, D. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley.
 - Makki, M., Showkatbakhsh, M., Song, Y. (2019). *Wallacei Primer 2.0* [Archivo PDF]. Disponible en <https://www.wallacei.com/>.
 - Nagy, D. (23 de enero de 2017). *The problem of learning*. Medium. <https://medium.com/generative-design/generative-design-introduction-64fb2db38e1>
 - Nagy, D. (24 de enero de 2017). *Learning from nature*. Medium. <https://medium.com/generative-design/learning-from-nature-fe5b7290e3de>
 - Nagy, D. (24 de enero de 2017). *The design space*. Medium. <https://medium.com/generative-design/step-1-generate-6bf73fb3a004>
 - Nagy, D. (24 de enero de 2017). *Designing measures*. Medium. <https://medium.com/generative-design/designing-measures-2c66a71b2ff3>

- Nagy, D. (19 de marzo de 2017). *Design optimization*. Medium. <https://medium.com/generative-design/design-optimization-2ec2ba3b40f7>
- Nagy, D. (26 de enero de 2017). *Evolving design*. Medium. <https://medium.com/generative-design/evolving-design-b0941a17b759>
- Nagy, D. (12 de febrero de 2017). *Control strategies*. <https://medium.com/generative-design/control-strategies-b4cf07b26cda>
- Kocatürk, T., Benachir, M. (Ed.). (2011). Interview with Lars Hesselgren, Director PLP Research. *Distributed Intelligence in Design*, 247-251.
- Makki, M., Matsuoka, M., Ilic, A., Franceschini, L., Beneitez, J. (2020). Bridging the Gap Between Traditional Japanese Fabrication and Advanced Digital Tools. *SimAUD 2020*, 557-564.
- Architectural Association School of Architecture. (209). *Proyecto desarrollado en el programa Visiting School, Osaka, Japón*. [Mixto]. *Wallacei*. <https://www.wallacei.com/aavs-osaka>

Índice de figuras	Figura 001 Diagrama del diseño computacional	015
	Figura 002 Dualidad de las características de la arquitectura	017
	Figura 003 Componentes generales del diseño computacional generativo	019
	Figura 004 Diagrama de un nodo y sus conexiones	020
	Figura 005 Sistema ortogonal y sistema adaptable	022
	Figura 006 Espacio de diseño	029
	Figura 007 Novedad frente a rendimiento	029
	Figura 008 Exploración frente a explotación	030
	Figura 009 Sesgo frente a varianza	031
	Figura 010 Complejidad frente a continuidad	032
	Figura 011 Estrategias de control directas	033
	Figura 012 Bosquejo de la estructura del esquema	034
	Figura 013 Diagrama simplificado de un objetivo de optimización	037
	Figura 014 Restricción como objetivo de optimización	038
	Figura 015 Diagrama del funcionamiento de un algoritmo genético	041
	Figura 016 Frente de pareto aplicado al diseño	043
	Figura 017 Architectural Association School of Architecture. (2009). Proyecto desarrollado en el programa Visiting School, Osaka, Japón. [Mixto]. Wallacei. https://www.wallacei.com/aavs-osaka	045
	Figura 018 Análisis de uniones del caso de estudio, adaptado de [fotografía del proyecto construido y modelo digital] [mixto], por Architectural Association Architecture School. (2019). Wallacei. https://www.wallacei.com/aavs-osaka	046
	Figura 019 Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca	050
	Figura 020 Sitio de emplazamiento	051
	Figura 021 Bocetos iniciales de los criterios de diseño	053
	Figura 022 Configuración formal paramétrica del pabellón	054
	Figura 023 Diagrama del objetivo ‘minimizar el sobrante de corte’	057
	Figura 024 Diagrama del objetivo ‘índice relación volumen-peso’	057

Figura 025	Diagrama objetivo 'minimizar oclusiones'	058
Figura 026	Diagrama objetivo 'elusión de obstáculos'	059
Figura 027	Diagrama objetivo 'longitudes bajo el límite permitido'	059
Figura 028	Diagrama objetivo 'deflexiones dentro del rango admisible'	060
Figura 029	Esquema desarrollado	062
Figura 030	Resultados generales de la simulación	064
Figura 031	Distribución de soluciones válidas	065
Figura 032	Gráfico de coordenadas paralelas de la simulación (GCP)	066
Figura 033	Gráfica de aptitud combinada de las soluciones válidas	070
Figura 034	Gráfica de aptitud del objetivo 'minimizar oclusiones'	070
Figura 035	Gráfica de aptitud del objetivo 'índice peso-volumen'	070
Figura 036	Gráfica de aptitud del objetivo 'minimizar sobrante de corte'	071
Figura 037	GCP de los grupos de soluciones válidas únicas	071
Figura 038	Representación gráfica de las soluciones válidas únicas	072
Figura 039	Soluciones seleccionadas	074
Figura 040	Emplazamiento	078
Figura 041	Planta de cubiertas	079
Figura 042	Planta de cimentación	080
Figura 043	Planta de estructura de paneles de piso	081
Figura 044	Planta	082
Figura 045	Planta de estructura de cubierta	083
Figura 046	Vista frontal	084
Figura 047	Vista lateral derecha	084
Figura 048	Vista lateral izquierda	085
Figura 049	Vista posterior	085
Figura 050	Detalle 001. Cimentación-Pilar principal	086
Figura 051	Detalle 002. Cimentación-Pilar de apoyo	086
Figura 052	Detalle 003. Ensamble de módulo de piso	087
Figura 053	Detalle 004. Ensamble de cercha y unión con pilar	087

Figura 054	Detalle 005. Ensamble de encuentro entre elementos de cubierta	087
Figura 055	Piezas únicas	088
Figura 056	Elementos de cimentación y columnas, codificación y ubicación	089
Figura 057	Elementos de panel de piso, codificación y ubicación	090
Figura 058	Elementos de cercha, codificación y ubicación	091
Figura 059	Vigas de cubierta, codificación y ubicación	092
Figura 060	Cabios, codificación y ubicación	093
Figura 061	Placas metálicas para cubierta, codificación y ubicación	094
Figura 062	Axonometría explotada	095
Figura 063	Secuencia constructiva módulo tipo	096
Figura 064	Secuencia constructiva pabellón completo	098
Figura 065	Fotomontaje arquitectónico	100

Índice de tablas	Tabla 001 Criterios de aptitud del caso de estudio, de [Criterios de aptitud de la propuesta seleccionada] [tabla], por Architectural Association Architecture School. (2019). Wallacei. https://www.wallacei.com/aavs-osaka	047
	Tabla 002 Secciones de madera utilizadas	052
	Tabla 003 Variables y objetivos de diseño	056
	Tabla 004 Secuencia genética de todas las soluciones válidas	068
	Tabla 005 Grupos de soluciones válidas únicas	071
	Tabla 006 Secuencia genética de las soluciones válidas únicas	072

Anexos

CONTEO DE PIEZAS

#	Cód.	Cant.	Subcód.	Cant.
Dados de cimentación		57		
Columnas	CO_A	38		
Apoyos	CO_B	19		
Paneles de piso		19	PS_A	1
			PS_B	1
			PS_C	1
			PS_D	1
			PS_E	1
			PS_F	1
			PS_G	2
Recubrimiento de piso	RS	19		
Ángulo columna/viga		38		
Cerchas	RA_A	5	RA_A_01	1
			RA_A_02	1
	RA_B	8	RA_B_01	1
			RA_B_02	1
			RA_B_03	1
	RA_C	2	RA_C_01	1
			RA_C_02	1
			RA_C_03	1
			RA_C_04	1
			RA_C_05	1
	RA_D	4	RA_D_01	1
			RA_D_02	1
			RA_D_03	1
			RA_D_04	1
			RA_D_05	1
Vigas diagonales	DI_A	4		
	DI_B	1		
	DI_C	2		
	DI_D	6		
	DI_E	3		
	DI_F	3		
Vigas contorno interior	CI_A	2		
	CI_B	2		
	CI_C	8		

#	Cód.	Cant.	Subcód.	Cant.
	CI_D	3		
	CI_E	2		
	CI_F	1		
	CI_G	1		
Vigas contorno exterior	CE_A	4		
	CE_B	1		
	CE_C	2		
	CE_D	2		
	CE_E	1		
	CE_F	1		
	CE_G	1		
	CE_H	4		
	CE_I	1		
	CE_J	1		
	CE_K	1		
Cabios	CA_A	3	S, M, L	3
	CA_B	5	S, M, L	3
	CA_C	5	S, M, L	3
	CA_D	2	S, M, L	3
	CA_E	1	S, M, L	3
	CA_F	1	S, M, L	3
	CA_G	1	S, M, L	3
	CA_H	1	S, M, L	3
	CA_I	1	S, M, L	3
	CA_J	2	S, M, L	3
	CA_K	1	S, M, L	3
	CA_L	3	S, M, L	3
	CA_M	2	S, M, L	3
	CA_N	1	S, M, L	3
	CA_O	1	S, M, L	3
	CA_P	1	S, M, L	3
	CA_Q	3	S, M, L	3
	CA_R	2	S, M, L	3
	CA_S	1	S, M, L	3
	CA_T	1	S, M, L	3
Placas metálicas	001-114	114		

UCUENCA

ÁNGULOS DE DOBLEZ DE PLACAS METÁLICAS

#	25.6°	44.5°	55°	#	55°	80.5°	99.5°
001	X			058	X		
002	X			059	X		
003		X		060	X		
004	X			061	X		
005		X		062	X		
006		X		063	X		
007		X		064	X		
008	X			065	X		
009	X			066	X		
010	X			067	X		
011		X		068	X		
012		X		069	X		
013	X			070	X		
014	X			071	X		
015		X		072	X		
016		X		073	X		
017		X		074	X		
018	X			075	X		
019		X		076	X		
020	X			077			X
021		X		078			X
022	X			079			X
023	X			080		X	
024	X			081		X	
025		X		082		X	
026		X		083			X
027	X			084		X	
028	X			085			X
029		X		086			X
030		X		087		X	
031		X		088		X	
032	X			089			X
033		X		090			X
034	X			091		X	
035	X			092		X	
036	X			093			X
037		X		094		X	
038		X		095			X
039			X	096		X	
040			X	097			X
041			X	098		X	
042			X	099			X
043			X	100			X
044			X	101		X	
045			X	102		X	
046			X	103			X
047			X	104			X
048			X	105		X	
049			X	106		X	
050			X	107			X
051			X	108		X	
052			X	109			X
053			X	110		X	
054			X	111			X
055			X	112			X
056			X	113		X	
057			X	114		X	

