



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Parametrización de la Arquitectura: Implementación de sistemas paramétricos en proyectos arquitectónicos

Parametric design in architecture. Parametric design tools implementation on architectural projects

Autor

Cristina Simón Sanz

Director

Sergio Sebastián Franco

Codirector

Adela B. Pérez Crespo

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2019

Parametrización de la **Arquitectura:**
Implementación de sistemas paramétricos
en proyectos arquitectónicos

Cristina Simón Sanz

Resumen

La tecnología no para de evolucionar, algo que no sólo ha cambiado el modo de vida de la sociedad, sino también la forma de diseñar. Gracias a esto ha aparecido un nuevo método de diseño en el que lo más importante ya no es la forma final sino el proceso para llevarlo a cabo. Esta nueva forma de pensar la arquitectura se apoya en unas innovadoras herramientas informáticas que permiten desarrollarla.

Gracias a estos nuevos procedimientos y a pesar de que es un campo con un amplio potencial que todavía no se ha explotado por completo, podemos observar que las ventajas y posibilidades son infinitas. Algunas de las más destacables son la optimización de tiempo, la colaboración entre distintas disciplinas y la gestión de datos.

Este trabajo pretende investigar y descubrir las potencialidades del método de diseño paramétrico con las que conseguir más con menos. Para ello es necesario conocer los métodos actuales de fabricación digital y las estrategias a desarrollar en el proceso de diseño paramétrico.

Abstract

Technologies are in continued developing, not only have it changed the way of life, but it has also changed how to design. Due to that a new design method came out where how to perform the process has got more weight than the final form. This fresh thinking of architecture is based on TIC's what allows how to develop it.

Despite the fact that this field had mostly untapped potential, we can observe the infinite advantages and possibilities. Some of the most significant aspects are time optimization, a collaboration between the fields and data management.

This essay seeks to investigate and find out the potentials of the parametric design method in order to increase efficiency. Therefore, there is a need to learn about the emergent methods of digital production and the performing strategies during the parametric design.

Índice

Resumen	1
Cuestiones previas.....	5
Objetivo y motivación.....	7
Metodología y fuentes.....	8
Estructura del trabajo.....	9
1. Arquitectura paramétrica	10
1.1. Qué es la arquitectura paramétrica.....	11
1.2. De la producción en masa a la customización en masa.....	14
1.3. Evolución de medios técnicos en arquitectura.....	20
1.4. Herramientas paramétricas y aplicación en la arquitectura.....	24
1.5. Ventajas.....	28
2. Ejemplos de arquitectura paramétrica: Tres casos de estudio.....	32
2.1. Aviva Stadium. 2010. Populous.....	36
2.2. Serpentine Gallery Pavilion 2005. Álvaro Siza y Eduardo Souto de Moura.....	42
2.3. Elbphilharmonie de Hamburgo. 2016. Jacques Herzog y Pierre de Meuron.....	46
7. Conclusiones.....	50
8. Bibliografía.....	56
9. Listado de ilustraciones.....	62

**CUESTIONES
PREVIAS**

OBJETIVO Y MOTIVACIÓN

Este trabajo de fin de grado se realiza con el objetivo principal de explicar las características y ventajas de la arquitectura paramétrica como nuevo método de diseño. Se pretende mostrar cómo este influye en aspectos fundamentales de la arquitectura, especialmente en la forma, la estructura y la función, por considerar estos tres aspectos esenciales en la realización de una buena arquitectura.

Bajo mi punto de vista, la preocupación por estos tres atributos y la correcta combinación de ellos debe estar presente a la hora de diseñar un proyecto arquitectónico. Partiendo del hecho de que responder a la función prevista debe ser el objetivo principal a resolver, la estructura permitirá que el proyecto se materialice y la forma ayudará a establecer la relación entre este y el entorno más próximo, reflejando las intenciones finales del arquitecto.

Cabe destacar que este pensamiento ha sido recurrente a lo largo de la historia. Vitrubio, Alberti o Nervi¹ ya introdujeron la combinación de tres aspectos clave como base para la creación de la arquitectura. “Para Vitruvio (...) la arquitectura debía contener tres cualidades: firmitas, utilitas y venustas (...). Alberti prefirió llamar a estos atributos soliditas, comoditas y voluptas (...); y en unos tiempos más cercanos, Pier Luigi Nervi habló de estructura, función y forma” (Muñoz, 2017, p.20).

Vitruvio con *firmitas* y Alberti con *soliditas* buscaban mostrar la *estructura* como parte fundamental de la arquitectura, gracias a la cual esta se mantenía en pie. A su vez, definían *utilitas* y *comoditas*, respectivamente refiriéndose a la funcionalidad necesaria en todo edificio, por lo cual deberá responder al uso para el que esté diseñado. Por último, hacían referencia a la *forma* con sus términos *venustas* y *voluptas*, siendo estos “el conjunto de sensaciones que las formas arquitectónicas provocan en nuestro interior” (Muñoz, 2017, p.21). Estas ideas son importantes puesto que “firmitas, utilitas y venustas son las tres componentes de la arquitectura aún en nuestros días. Las tres deben estar presentes e integrarse equilibradamente en el proceso arquitectónico” (Alonso, 2005, p.71).

Con este objetivo, se realiza un análisis previo en el que se muestran los condicionantes que han llevado a la aparición de este método de diseño. Gracias a esta investigación, será posible comparar el diseño tradicional con el diseño paramétrico, buscando establecer y comprender los avances de las técnicas empleadas en él. Así, se persigue mostrar cómo la funcionalidad de las herramientas paramétricas puede ayudar a una optimización de recursos y tiempo. Todo esto se reflejará gracias al estudio de la utilización de estas herramientas en el desarrollo de proyectos reales, es decir, cómo estos procesos se han aplicado a distintos proyectos de arquitectura.

¹ Vitrubio y Alberti fueron arquitectos y tratadistas, romano e italiano respectivamente, destacados en la actualidad por sus aportaciones a la arquitectura. Mientras que Pier Luigi Nervi, ingeniero italiano, es destacado por su relación con el movimiento de arquitectura racionalista.

El diseño paramétrico ha ido desarrollándose desde su aparición a finales del siglo pasado y continúa haciéndolo en la actualidad. Es obvio que se ha convertido en una parte muy importante de la arquitectura y que su desarrollo traerá consigo nuevos caminos y formas de trabajar.

Esta premisa junto al interés personal por profundizar en el conocimiento de los procesos paramétricos son la razón fundamental que justifica la elección del tema desarrollado en este trabajo. No fue hasta el año pasado cuando conocí este método de diseño y al cual dedico mi actividad profesional actualmente. Se trata de un campo que, hoy por hoy, tiene todavía mucho margen de exploración en el mundo de la arquitectura convencional, pero con un gran potencial, abriendo todo un nuevo mundo de posibilidades, por lo que no descarto que en un futuro se convierta en el método de diseño fundamental para esta disciplina. Desde mi punto de vista, la gran mayoría de arquitectos se beneficiarían de conocerlo gracias a las ventajas que les puede conllevar su uso en el trabajo diario.

Además, la inquietud por explorar a fondo aquellos métodos arquitectónicos no estudiados específicamente a lo largo de la carrera, contribuye a la motivación de realizar un estudio analítico de este.

METODOLOGÍA Y FUENTES

Establecidos los objetivos del presente trabajo, se realiza una fase previa de investigación llevando a cabo una recopilación y análisis de información relacionada con el tema a tratar y con los casos de estudio.

Para la búsqueda de información, se parte de lo escrito por Manuel Castells en su libro *La ciudad informacional. Tecnologías de la información, estructuración económica y el proceso urbano regional* en el que relata la situación socioeconómica en la que nos encontramos y cómo hemos llegado a ella; y por Lluís Ortega en *La digitalización toma el mando* donde reflexiona sobre el impacto del desarrollo tecnológico en la arquitectura. También se ha recurrido a otros libros que se centran en aspectos más específicos del tema, como *A pattern language* de Christopher Alexander, *Proyecto y Construcción Digital en Arquitectura* de Nick Dunn, *Parametric Design for Architecture* de Wassim Jabi o *From Control to Design* de Michel Meredith, para después revisar los artículos publicados por numerosos autores en los que desarrollan el término de arquitectura paramétrica, como por ejemplo *Diseño paramétrico en Arquitectura: método, técnicas y aplicaciones* de Rodrigo García Alvarado, *El diseño paramétrico. El gran desafío del siglo XXI*. de Sandra Navarrete; o *A History of Parametric* de Daniel Davis entre otros.

Además de los libros encontrados en las bibliotecas de la ciudad y los artículos publicados en internet, se recurre a la experiencia personal por el conocimiento del tema debido a su desarrollo en la práctica laboral.

Por último, cabe destacar el hallazgo de un trabajo de fin de grado realizado en esta universidad “*Arquitecturas efímeras con herramientas paramétricas*” realizado por M^a Pilar Viamonte Fernández en el que trata este tema desde otro punto de vista, desarrollando el análisis del diseño paramétrico mediante el uso de estas herramientas en arquitecturas temporales.

La gran cantidad de información encontrada, tanto en inglés como en español, supuso una dificultad a la hora de acotar el tema. Por ello, se decidió que este trabajo fuese el punto de partida de una futura investigación en la que profundizar. La intención sería proporcionar al lector una información introductoria al tema aplicada a tres aspectos en concreto considerados imprescindibles en la arquitectura, forma, estructura y función.

ESTRUCTURA DEL TRABAJO

Tras haber realizado la primera fase de estudio de la información recopilada y la obtención de material gráfico se procede a la redacción del trabajo que queda dividido en dos partes.

La primera de ellas está dedicada a la presentación del tema al lector, la arquitectura paramétrica, así como el análisis de su contexto histórico e influencias, sus aplicaciones y ventajas. La metodología empleada para analizar la transición hacia una arquitectura digital y hacia el diseño paramétrico se basa en una comparación de los cambios acaecidos en la sociedad y en la arquitectura desde la Revolución Industrial hasta la Revolución Digital, en la que nos encontramos inmersos. Además, se realiza un estudio de las técnicas y metodologías de modelado digital, incluyendo el paso de herramientas tradicionales a herramientas paramétricas; la optimización de procesos en el diseño, así como la simplificación de geometrías complejas.

La segunda parte consiste en el análisis de tres casos de estudio. Para comprender la aplicación práctica del diseño paramétrico y de las herramientas descritas, se realiza un estudio de tres obras arquitectónicas construidas, que responden a las tres particularidades anteriormente señaladas, forma, estructura y función, en las que se ha utilizado esta tecnología para su creación. En primer lugar, se realiza una breve explicación del proyecto y los arquitectos que la han llevado a cabo, para después analizar el método de diseño aplicado, así como las ventajas que ha traído el uso de este.

Por último, se desarrollan las conclusiones personales resultantes de la realización del presente trabajo.

CAPÍTULO 1

**ARQUITECTURA
PARAMÉTRICA**

1.1. QUÉ ES LA ARQUITECTURA PARAMÉTRICA

Los avances científicos y tecnológicos desarrollados en la industria y la construcción, fundamentalmente desde mediados del siglo XX, han dado lugar a la aparición de innovadoras herramientas digitales que son de aplicación, entre otros campos, al diseño y la arquitectura. Gracias a ellas, se han realizado proyectos antes impensables basados en la parametrización de la propia arquitectura.

Para enmarcar todo este nuevo mundo de posibilidades vamos a empezar a explicarlo desde lo más básico, su nomenclatura. La palabra paramétrico proviene de parámetro que tiene su origen etimológico en las palabras griegas para ('al margen de', 'junto a' o 'contra') y metron (medida). Se trata de un término que representa o determina una medida y sirve para medir comparativamente con él. En lo relativo al diseño paramétrico, se entiende el parámetro como aquel valor o conjunto de valores a partir de los cuales, aplicando una serie de algoritmos u operaciones más o menos complejas, se llega al proyecto arquitectónico final. Este valor será fijo o variable en función de la etapa de diseño en que nos encontremos en un determinado momento y permitirá en todo caso la comparación de los resultados obtenidos en el supuesto de fijar el parámetro en uno u otro valor.

Se denomina diseño paramétrico a un tipo de diseño digital que trabaja sobre el proceso de creación, es decir, que se centra en diseñar el procedimiento a seguir para obtener los resultados deseados (sean estos normativos, de construcción, funcionalidad u otros), y no el resultado final conseguido. "No se trata ya tanto de imaginar una forma determinada, sino de tener la capacidad de concebir y diseñar las relaciones y reglas que articulan entre sí los objetos, familias y partes componentes de un proyecto arquitectónico" (Rodas y Benavides, 2017, p.54). Como Navarrete (2014) dice: "se ha generado una nueva forma de proyectar, atendiendo al proceso y sus múltiples variaciones" (p.1).

La principal ventaja de este tipo de diseño es la exploración y comparación de distintos resultados sin necesidad de desarrollar cada uno de ellos individualmente. A partir de la introducción de parámetros relacionados entre sí y restricciones establecidas previamente se configura el proceso de diseño. Esto "(...) permite(n) al diseñador interactuar constantemente con el modelo a través del código" (Peteinarelis y Yiannoudes, 2016, p.1). La modificación de un parámetro de entrada recorrerá el código generado, actualizando cada uno de los nodos que lo conforman, y se traducirá en la variación del modelo final. De modo que, si es necesario modificar alguno de los datos, se puede realizar sin tener que invertir demasiado tiempo.

La representación paramétrica trabaja sobre el proceso de diseño del modelado y no sobre su resultado final. Esto hace posible que se pueda reescribir la historia de una

representación en cualquier momento; alterando partes de ella y observando sus consecuencias. (Coloma y Mesa, 2012, p. 4)

Para desarrollar este método se hace uso de las herramientas de diseño paramétrico, las cuales, por definición, son interfaces de programación más o menos complejas (desde programación visual a programación de bajo nivel). Por su carácter matemático y lógico, tienen limitaciones en cuanto a la representación de geometrías. Es por ello que las principales herramientas utilizadas actualmente en el mundo del diseño y la construcción se emplean fundamentalmente integradas en softwares de diseño tipo CAD o BIM: Dynamo+Revit, DynamoStudio+AutoCad, Grasshopper+Rhinoceros, entre otros. En el primer elemento de cada uno de estos pares se trabaja el código que da lugar a la forma, mientras que en el segundo se gestionan las geometrías.

1.2. DE LA PRODUCCIÓN EN MASA A LA CUSTOMIZACIÓN EN MASA

El impacto de las tecnologías de la información en la denominada era digital está provocando cambios en la manera de concebir y entender la arquitectura que pueden compararse a los que produjeron la perspectiva geométrica en el Renacimiento, la Revolución Industrial en el siglo XIX y los avances tecnológicos y científicos a principios del siglo XX. (Fernández Álvarez, 2015. p.3).

La sociedad contemporánea se encuentra inmersa en un periodo de transición desde el industrialismo al informacionalismo, como Castells¹ (1995) define al modelo de desarrollo en el que la información sustituye a la mano de obra. Afirma que la revolución tecnológica ha influido en la sociedad transformando dos variables esenciales como son el tiempo y el espacio.

En este momento se está produciendo un cambio de paradigma debido a la aparición de nuevas herramientas digitales, como pueden ser los ordenadores. Gracias a la mejora y desarrollo de estos se han ido sucediendo avances, como la aparición de la representación digital o la gestión de bases de datos, que han originado una evolución desde la producción en masa a la customización en masa.

Para poder analizar e ilustrar cómo ocurrió esta transición se realizará un breve repaso comparativo entre los avances acaecidos gracias a la Revolución Industrial y a la Revolución Digital.

REVOLUCIÓN INDUSTRIAL

A nivel social, lo que significó la Revolución Industrial a finales del siglo XVIII es equiparable a lo que sucede en nuestros días con la tecnología y la información. La Revolución Industrial supuso profundas transformaciones económicas y sociales, especialmente reflejadas en la industria. Gracias a la aparición de nuevas fuentes de energía como los combustibles fósiles y la electricidad se evolucionó de una producción artesanal a una mecanizada. La introducción de las máquinas (*Figura 1.12.1.*) se tradujo en una sistematización de los procesos, de modo que se aumentó en gran medida el rendimiento de trabajo reduciendo los costes de producción.

Como consecuencia de la implantación de la producción mecanizada comenzó la producción en masa (*Figura .2.2.*), en la que se creaban productos idénticos, sin capacidad de variación de unos a otros. Además, la estructura de producción estaba basada en el método prueba-error, sin comprobaciones previas, lo que hacía que, en muchas ocasiones, fueran necesarias modificaciones a posteriori, lo que se convertía en un gasto de producción mayor.

¹ Manuel Castells, sociólogo español, en su libro *La ciudad informacional. Tecnologías de la información, estructuración económica y el proceso urbano regional* analiza la relación entre las nuevas tecnologías de la información y las consecuencias socioeconómicas.



Figura 1.2.1. Producción mecanizada en fábricas gracias a la Revolución Industrial.

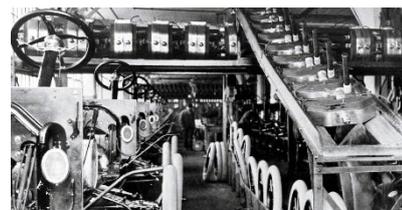


Figura 1.2.2. Gracias a la mecanización de los procesos apareció la producción en masa.

En el s.XIX la arquitectura comienza a incorporar las tecnologías y materiales que la Revolución Industrial introdujo en la sociedad. El sistema de producción evoluciona, las máquinas permiten la prefabricación y reclaman la creación de estándares para la homogeneización de los productos.

Antes de la Revolución Industrial los artesanos creaban elementos singulares con unas características propias, cada objeto era diferente al anterior; a partir del s.XIX, y con la aparición de las máquinas, los objetos ya no eran fabricados manualmente, por lo que fue necesario establecer unos estándares previos a la fabricación de modo que todos los elementos producidos fueran iguales. Esto desencadenó la producción en masa.

Un ejemplo de este nuevo pensamiento fue la escuela de arquitectura de la Bauhaus, fundada en 1919 por Walter Gropius (*Figura 1.2.3.*), ya que algunos de los pilares fundamentales de su enseñanza de la arquitectura se basaban en la mecanización, la estandarización y la racionalización. La Bauhaus quiso importar los medios de producción utilizados en otros campos de la ingeniería, como la ingeniería automotriz, a la arquitectura, siendo su principal objetivo reducir los tiempos de obra y abaratar los costes de producción.



Figura 1.2.3. Escuela de arquitectura Bauhaus fundada en 1919.

Ernst Neufert fue uno de los primeros alumnos de esta escuela. Tras terminar los estudios realizó un viaje por Europa, donde comprobó que la arquitectura seguía anclada en los procesos constructivos del pasado; aunque la producción en masa era un hecho, esta no había llegado todavía a muchos aspectos de la vida diaria. En 1922 se produjo una transformación que provocaría el cambio principal en la mentalidad de la sociedad: se elaboró la norma DIN 476, que normaliza los formatos de papel. Esta estandarización se fue extendiendo al resto de elementos relacionados con él, como puede ser una estantería o el tamaño de las paredes de las bibliotecas. Estos sumado a su paso por la escuela llevaron a Neufert a consolidar la industrialización de la arquitectura a partir de la estandarización de sus medidas. En 1936 publica su libro "Bauteurwuchslehre" traducido al español como "El arte de proyectar en arquitectura", que pretendió ser el documento de referencia de las medidas mínimas y estándar de los distintos elementos de la arquitectura. En él recoge múltiples tipos constructivos y los elementos presentes en casi cualquier proyecto, desde electrodomésticos a escaleras.

Uno de los principales logros de Neufert fue la normalización de la unidad mínima de construcción, el ladrillo, creando uno de 25x12,5cm. Gracias a ello se racionalizaban todos los procesos constructivos basados en fábrica de ladrillo. Se normalizaban los anchos, los aparejos, los huecos en fachada, así como los anchos de las estancias.

Unos años más tarde, Le Corbusier continúa con esta idea en su libro “Le Modulor” (*Figura 1.2.4.*) en el que diseña un sistema de medidas basado en el hombre y la naturaleza. Además, esta idea de estandarización también se ve reflejada en la Maison Dom-ino, pensada como unidad básica de construcción a partir del cual diseñar una vivienda que pueda ser construida en serie.

REVOLUCIÓN DIGITAL

Igual que la Revolución Industrial introdujo la producción en masa, pudiendo crear miles de copias de un mismo prototipo, la Revolución Digital en la que nos encontramos inmersos ha supuesto un cambio en el paradigma de la arquitectura (Mitchell², 2007). La llegada de las tecnologías de fabricación digital ha permitido el cambio en las instrucciones de fabricación entre cada uno de los objetos fabricados, de modo que, al ser un proceso parametrizado, el coste de personalizar es similar al de producir en masa la misma cantidad de productos idénticos.

Con la aplicación de los diseños digitales se ha reemplazado la fabricación lineal por los modelos paramétricos. Estos integran diseño y producción y, como consecuencia, son capaces de generar formas flexibles, complejas y adaptables, consiguiendo infinitas posibilidades. La representación arquitectónica “ya no se limita a seguir un desarrollo lineal, sino que permite dar una vuelta atrás y una revisión constante y ágil de sus ideas” (Alonso, Galván y Álvaro, 2016, p.458). Mientras que en el diseño lineal cada vez que el proyecto se modifica debe reconstruirse cada una de sus partes, en el modelo de representación paramétrico, al estar basada en la descripción del proceso de modelado, se pueden introducir variaciones sin necesidad de mayor tiempo ni coste de producción, convirtiendo los modelos en recursos interactivos. Como Fernández Álvarez (2015) afirma: “Se establece así en la práctica de la arquitectura el ‘paradigma digital’ que se caracteriza por la consideración de la no-linealidad, la velocidad y el aprovechamiento de las posibilidades de cambio y mutación favorecidos por la digitalización” (p.4).

Si bien el diseño paramétrico se ha intuido en otras épocas de la historia, no es hasta los últimos 20-25 años cuando arquitectos como Peter Eisenman, Greg Lynn o Marcos Novak empiezan a investigar y experimentar con el diseño digital en su trabajo (Peteinarelis y Yiannoudes, 2016). El diseño asistido por ordenador les ha permitido diseñar y construir edificios y estructuras geoméricamente complejas.

En 1997 es cuando Frank Gehry utiliza por primera vez el potencial de las tecnologías digitales para llevar a cabo el proyecto del Museo Guggenheim de Bilbao (*Figura 1.2.5.*), convirtiéndose en el primer arquitecto en realizar la construcción de un edificio formalmente complejo con tecnología digital. Para su diseño

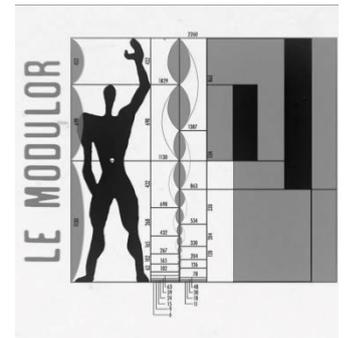


Figura 1.2.4. Sistema de medidas Le Modulor de Le Corbusier.

² William J. Mitchell fue un arquitecto australiano destacado por integrar la práctica arquitectónica y los avances tecnológicos.



Figura 1.2.5. Museo Guggenheim diseñado por Frank Gehry.

estructural su estudio hizo uso del software CATIA, desarrollado por Dassault Systèmes para la industria aeroespacial en 1981.

En 2008 Patrik Schumacher, socio de Zaha Hadid Architects, presenta el término parametricismo en “Parametricism as Style” manifiesto del parametricismo, donde afirmaba que este sería el gran nuevo estilo después del modernismo. Schumacher (2008) afirma:

“Parametricism is a mature style. That the parametric paradigm is becoming pervasive in contemporary architecture and design is evident for quite some time” [El parametricismo es un estilo maduro. Que el paradigma paramétrico se está generalizando en la arquitectura y el diseño contemporáneo es evidente desde hace bastante tiempo].

Pero más que un estilo arquitectónico, en mi opinión el proceso paramétrico se trata de un nuevo método de diseño que gracias a la buena utilización de unas potentes herramientas puede ayudar a diseñar y construir edificios más rápida y eficientemente.

El método paramétrico no solo se trata de un método de diseño sino también de producción, gracias a la aparición de máquinas de fabricación digital y a la tecnología CNC (control numérico computerizado) se permite la fabricación de una mayor cantidad de productos diferentes, evitando así la estandarización, de modo que se realicen a mayor velocidad y con menor coste.

Como hemos visto, la arquitectura paramétrica nos ofrece posibilidades infinitas, aunque su aplicación todavía se limita principalmente a aquellos proyectos geoméricamente complejos, dejando sin aprovechar su potencial en proyectos más sencillos de la práctica diaria de cualquier arquitecto.

1.3 EVOLUCIÓN DE LOS MEDIOS TÉCNICOS EN ARQUITECTURA

Este tipo de diseño, a pesar de parecer novedoso, tiene su génesis en los trucos matemáticos empleados por algunos arquitectos, así como en las teorías desarrolladas por teóricos como Durand o Palladio, quienes crearon tratados que podrían considerarse descripciones de un proceso de diseño condicionado por una serie de parámetros.

Además, cabe mencionar que el pensamiento paramétrico está presente de manera implícita en cualquier proyecto tradicional. Cuando hablamos de diseño, ya sea urbano o de edificaciones, antes de dibujar la primera línea ya se han estudiado las preexistencias: accidentes geográficos, orientación, elementos presentes en el entorno; es decir, cualquier diseño arquitectónico está condicionado por factores externos, por lo que podemos afirmar que toda arquitectura y diseño está basado en parámetros. Sin embargo, la digitalización de la arquitectura ha permitido un mayor desarrollo y avance del diseño paramétrico.

En los textos consultados destacan las figuras de Antonio Gaudí, Frei Otto y Buckminster Fuller, por ser considerados referentes o precursores de la arquitectura paramétrica, destacados por las contribuciones filosóficas que aportaron a este novedoso método de diseño. Ya a principios del s.XIX, Gaudí (*Figura 1.3.1.*) comprobó como la alteración de los datos de entrada conseguía modificar el resultado final. Por su parte, Frei Otto (*Figura 1.3.2.*) refleja el potencial tecnológico de la prefabricación y la producción en serie. Algo similar a lo que Buckminster Fuller (*Figura 1.3.3.*) mostró con su prototipo de cúpula geodésica.

La aparición de los ordenadores simplificó la complejidad de los cálculos. Sutherland¹ aprovechó esta ventaja para desarrollar el primer programa informático en 1963 que permitió la manipulación de objetos gráficos, Sketchpad (*Figura 1.3.4.*). “Proponía la primera interfaz gráfica de usuario, que permitía dibujar con el ordenador y aplicar cambios al diseño de forma paramétrica” (Fernández Álvarez, 2015, p.333). La diferencia con un dibujo hecho con lápiz y papel es la capacidad de asignarle condiciones matemáticas.

Como hemos visto, existió el pensamiento paramétrico, pero no fue desarrollado en profundidad ya que la complejidad que suponía derivaba en costes y plazos inasumibles; buen ejemplo de ello es la Sagrada Familia de Gaudí, que a pesar de su simplicidad constructiva y estructural ha requerido de más de un siglo para completarse ya que las herramientas constructivas disponibles no estaban alineadas con el diseño propuesto por el arquitecto.

Veinte años más tarde de la aparición de los primeros ordenadores, en 1982, cuando estos comenzaban a ser más asequibles,



Figura 1.3.1. Cripta de la Colonia Güell. Antonio Gaudí.



Figura 1.3.2. Pabellón Alemán. Frei Otto.



Figura 1.3.3. Cúpula geodésica. Buckminster Fuller.

¹ Ivan Edward Sutherland fue un programador pionero en la iteración persona-ordenador (Delgado, 2017).

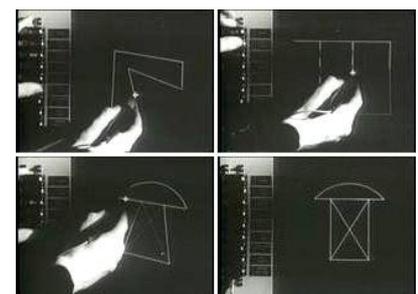


Figura 1.3.4. Sketchpad. Ivan Sutherland.

apareció AutoCAD, programa que revolucionó el diseño arquitectónico. El diseño asistido por ordenador sustituyó los dibujos sobre el tablero por dibujos bidimensionales en ordenador, pasando de un diseño analógico a uno digital. Pero como Iwamoto (2009) dice:

“Yet for many years, as the process of making drawings steadily shifted from being analog to digital, the design of buildings did not really reflect the change. CAD replaced drawing with a parallel rule and lead pointer, but buildings looked pretty much the same. (...) one form of two-dimensional representation simply replaced another. It took three-dimensional-computer modeling and digital fabrication to energize design thinking and expand the boundaries of architectural form and construction” [Durante muchos años, y aunque el proceso de hacer dibujos había pasado de ser analógico a ser digital, en el diseño de edificios no se reflejó el cambio. El diseño asistido por ordenador sustituyó los dibujos hechos sobre el tablero, pero los edificios seguían teniendo prácticamente el mismo aspecto: una forma de representación bidimensional reemplazó a otra. Fue necesaria la aparición del modelado tridimensional por ordenador y de la modelación digital para dinamizar el pensamiento de diseño y expandir los límites de la forma arquitectónica y la construcción] (p.5).



Figura 1.3.5. Estudios de arquitectura previos a la Revolución



Figura 1.3.6. Estudios de arquitectura tras la aparición de los

Aunque los ordenadores ya se usaban en otros ámbitos, los primeros intentos por introducirlos en el campo del diseño arquitectónico eran pruebas experimentales. Ahora, tres décadas después, vemos justo lo contrario, han simplificado y optimizado de tal manera los recursos y el proceso de diseño y presentación de los proyectos que es difícil imaginarse diseñar, detallar y hacer copias de los distintos documentos que componen un proyecto de arquitectura de manera analógica (Figura 1.3.5. y 1.3.6.).

1.4 HERRAMIENTAS PARAMÉTRICAS Y APLICACIÓN EN LA ARQUITECTURA

“El proceso de diseño paramétrico se divide en cuatro fases fundamentales: definición de condicionantes iniciales, descripción del proceso de diseño, ejecución del mismo y análisis e interpretación de los resultados obtenidos” (García Alvarado, 2013, p.4).

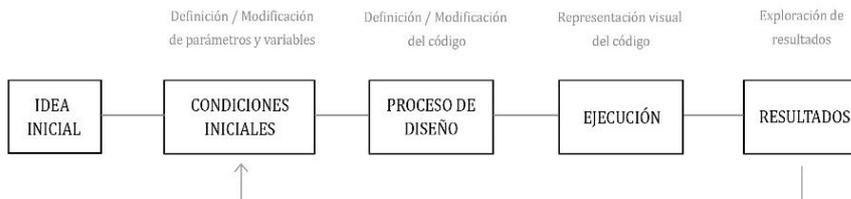


Figura 1.4.1. Esquema proceso de diseño paramétrico. Elaboración propia.

DEFINICIÓN DE CONDICIONANTES PREVIOS

Para iniciar el proceso de diseño debemos establecer unos condicionantes previos, ya sean restricciones u objetivos a tener en cuenta para conseguir el resultado deseado.

Un mismo diseño paramétrico puede mostrar diferentes resultados tan sólo variando la información de entrada, por ello es importante definir estos condicionantes.

Se considerarán condicionantes aquellos valores que sean susceptibles de cambiar a lo largo del proceso de diseño.

DEFINICIÓN DEL PROCESO DE DISEÑO

El proceso de diseño consiste en un flujo de datos y operaciones definidas con una herramienta de programación visual, como puede ser Dynamo¹. “La programación visual consiste en establecer las instrucciones y relaciones de nuestro programa a través de una interfaz de usuario gráfica o visual, en lugar de ingresar código vinculado por sintaxis” (Rodas y Benavides, 2017, p.61).

Debemos elaborar una programación definiendo una serie de nodos interconectados entre ellos para llegar a la solución deseada. El conjunto de estos nodos configura un código en el que podemos modificar los parámetros de entrada de modo que consigamos diferentes soluciones.

Dada la complejidad de algunos códigos, es interesante plantearse previamente, de manera conceptual, cuál va a ser la estructura de los mismos. De esta manera se evita redundar en la realización de operaciones y simplificar el proceso de cálculo que el equipo realizará.

¹ Existen programas informáticos de diversos tipos que sirven de apoyo a arquitectos, ingenieros y otros diseñadores a la hora de realizar diseños paramétricos. Uno de ellos es Dynamo, que por estar asociado a Revit tiene un gran potencial no sólo como programa de diseño sino también en el campo de la gestión. Este es una plataforma de software de código abierto para el diseño computacional. A través de su interfaz visual permite construir flujos de trabajo para encontrar soluciones óptimas.

EJECUCIÓN DEL PROCESO DE DISEÑO

La ejecución corresponde a hacer funcionar el código introducido con los parámetros de entrada de modo que devuelva los resultados. Se puede ejecutar siempre que modifiquemos los valores de entrada, de modo que nos mostrará variedad de resultados. Es la acción principal del diseño paramétrico.

Conviene tener en cuenta que, como en cualquier otro lenguaje de programación, cuanto más optimizado y “limpio” sea el código realizado, es decir cuanto más depurado esté, más rápida será la ejecución del mismo. Cuanto más complejo es un proyecto mayor importancia cobra la corrección y simplificación de las operaciones para evitar sobrecargar los equipos.

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

El diseño paramétrico no siempre muestra el resultado final puesto que es un proceso intermitente, en el que podemos modificar los parámetros y obtener como consecuencia un nuevo resultado. Además de modificar o desechar opciones generadas, llegado al final del proceso el arquitecto puede crear nuevas aplicando condicionantes no incluidos al comienzo. El bajo coste que supone la creación de infinitas soluciones los convierte en modelos interactivos. Por ello decimos que el diseño paramétrico no define una forma final si no que se trata de un proceso de diseño.

Los resultados finales obtenidos se pueden exportar bien como una base de datos, por ejemplo, Excel, o como una geometría; o se pueden traspasar a un sistema de diseño para ser integrados en el proyecto gracias a su interacción con otros softwares, como en el caso de Dynamo es Revit. Esto permite la incorporación de distintas partes de un proyecto, así como su modificación en función de otras en un solo modelo, que realizado de manera tradicional conllevaría una gran cantidad de trabajo de delineación.

Como vemos, la implementación de un proceso de diseño paramétrico requiere seleccionar y elaborar los procedimientos y verificar su ejecución, así como revisar los resultados obtenidos. Cabe destacar que la ejecución de un proceso paramétrico se puede llevar a cabo en distintas fases del diseño arquitectónico.

1.5 VENTAJAS

La principal ventaja del método de diseño paramétrico frente al tradicional se basa en la capacidad de modificar fácilmente el proyecto. El bajo coste que tiene la obtención de resultados diferentes ofrece la posibilidad de interactuar constantemente con el modelo. Ajustando parámetros o modificando las relaciones entre los nodos que lo definen permite generar infinitas posibilidades de diseño. Además, el sistema paramétrico permite reaccionar ante cambios o necesidades no previstas pudiendo desarrollar en paralelo los procesos necesarios.

Esta herramienta ayuda a reducir el tiempo necesario y a optimizar los procesos de modelados al permitir que tanto los procesos de representación como los de diseño se desarrollen de forma no lineal. La posibilidad de desarrollar procesos de diseño no lineales abre las puertas a una cooperación entre los implicados en todas las fases del ciclo de vida del edificio. Leon y Laing (2013) afirman que "la colaboración efectiva en el diseño durante las primeras etapas de diseño en arquitectura es una condición para un diseño y construcción general efectivo" lo que termina traducándose en una reducción de coste y tiempo (Turrin, Sariyildiz y Paul, 2015).

El método de diseño paramétrico es otra manera de entender el diseño, es un nuevo formato que posibilita realizar arquitectura compleja con poco esfuerzo (Dautremont, 2019). Gracias a la tecnología permite, partiendo de una idea, ver las infinitas formas de las que se puede plasmar.

Usar la tecnología paramétrica facilita el análisis y desarrollo de proyectos más precisos además de optimizar tiempo y costes a la hora de realizar proyectos.

Este método avanzado de diseño digital tiene numerosas ventajas además de las ya mencionadas que lo convierten en una opción más eficiente frente al tradicional.

- Libertad formal. Gracias al diseño paramétrico se pueden crear todo tipo de formas sin limitaciones, dejando atrás las formas geométricas comunes. Esto ha provocado un aumento de las formas imposibles de realizar sin el diseño paramétrico por su complejidad. (Dautremont, 2019)
- Diseños únicos. Debido al proceso de diseño empleado se pueden diseñar infinitas posibilidades, cada uno diferente al anterior.
- Eliminación de tareas repetitivas. Rodas y Benvides (2017) declaran que: "los softwares de programación visual poseen un gran potencial, tanto como herramientas generadoras de diseño y elementos, como herramientas de ayuda y automatización de procesos" (p.159).

- Infinitas fuentes de información. El diseño por ordenador y los programas utilizados permiten que los datos de entrada provengan de diferentes tipos de fuentes, ya sean bases de datos en Excel, geometrías dibujadas en AutoCAD
- Creación de bases de datos. Al igual que una base de datos puede ser un dato de entrada, también puede serlo de salida, consiguiendo agrupar los resultados en un archivo de fácil acceso.
- Gestión integral de proyectos (diseño, ingeniería, construcción). Estas herramientas tienen un gran potencial para agilizar procesos tanto en la etapa de diseño como en la de construcción. (Rodas y Benavides, 2017)

CAPÍTULO 2

EJEMPLOS DE ARQUITECTURA PARAMÉTRICA: TRES CASOS DE ESTUDIO

Con el objetivo de ayudar a comprender la aplicación práctica del diseño paramétrico y de las herramientas descritas, se realiza un estudio de diferentes obras arquitectónicas construidas en las que se utilizan como parte de su proceso de diseño y/o construcción. Para su análisis se clasifican en tres grupos dependiendo de la aplicación de las herramientas paramétricas en cada una de ellas y se explican cuáles han sido los procesos de diseño que se han llevado a cabo para conseguir estas arquitecturas.

La explicación comienza con una breve introducción de la arquitectura de cada uno de los proyectos en la que se hace una descripción formal y programática de los mismos (necesidades de uso, programa, funciones...) que permite conocerlos en profundidad. Asimismo, se hace hincapié en el arquitecto o arquitectos que lo llevan a cabo.

Siguiendo el método paramétrico para el proceso de diseño, se establecen las condiciones iniciales que los arquitectos tuvieron en cuenta en la creación de estas arquitecturas. Tras haber obtenido el modelo paramétrico se analizan los cambios aplicados o posibles, de los que es susceptible el proceso de diseño estudiado, viendo así las múltiples soluciones por las que pudieron pasar los proyectos, hasta llegar a su forma final.

El primero de los grupos a analizar es el que aplica el método de diseño paramétrico a la piel del edificio de modo que la forma final responda a los condicionantes del entorno. Se ha elegido para ello un estadio de fútbol, el Aviva Stadium de Populous, (*Figura 6.1.*) ya que se trata de un tipo de arquitectura con una imagen muy clara y similar entre distintos ejemplos del mismo tipo, en el que la función y el uso es sumamente dominante y deja poco lugar a la creatividad; gracias a la utilización del método paramétrico cada vez se ven más estadios con características propias complejas en su imagen exterior.

El segundo grupo muestra como el diseño paramétrico ayuda a los arquitectos a definir la estructura de un proyecto rápidamente. Muestra de ello son los pabellones temporales que se construyen cada año junto a la Serpentine Gallery en Londres. Debido a cómo está planteado este evento, el proyecto ganador debe construirse en poco tiempo, motivo por el cual algunos arquitectos se apoyan en el diseño paramétrico para realizar un diseño integral que les facilite la labor. Como ejemplo se estudia el proyecto de Álvaro Siza junto a Eduardo Souto de Moura para la Serpentine Gallery de 2005 (*Figura 6.2.*).



Figura 2.1. Imagen exterior del Aviva Stadium diseñado por Populous.

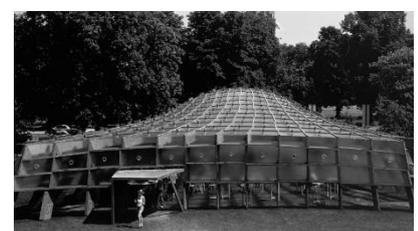


Figura 2.2. Imagen exterior del Serpentine Gallery Pavilion 2005 diseñado por Siza y Souto de Moura



Figura 2.3. Imagen exterior de la Filarmónica de Elba diseñada por Herzog & de Meuron.

Por último, el proyecto escogido, siendo este uno de los que mejor refleja el potencial del uso de las herramientas paramétricas en la arquitectura, bajo mi punto de vista, es la Filarmónica de Hamburgo, realizada por Jacques Herzog y Pierre De Meuron (*Figura 6.3.*). En este proyecto, a partir de unas condiciones iniciales muy concretas como es la acústica de una sala de conciertos, se define la forma y, por consiguiente, la estructura que debe tener el edificio.

Como vemos, se escogen estos proyectos por ser tres casos pragmáticos que ayudaran a mostrar cómo el método paramétrico influye en los aspectos fundamentales de la arquitectura anteriormente mencionados, forma, estructura y función, respectivamente.

2.1 AVIVA STADIUM. 2010. POPULOUS.

La arquitectura de los estadios de fútbol ha cambiado desde el siglo XIX hasta la actualidad; hoy en día se atiende más a la seguridad, al confort y a la separación del campo y de los espectadores, así como a la calidad estética y arquitectónica de la fachada y del interior. Todo esto ha derivado en que el uso del método de diseño paramétrico sea esencial para poder combinar todos estos requisitos.

En este tipo de edificación se aprecia claramente la evolución de la tecnología en los últimos años. Gracias a ello se ven avances en los diseños finales, como por ejemplo el interés por la imagen exterior en la que las pieles opacas pasan a tener más libertad, de modo que la forma exterior responda a los condicionantes del entorno próximo a la hora del diseño.

El Aviva Stadium, diseñado por Populous junto con la firma de ingeniería estructural BuroHappold, fue construido sobre la antigua ubicación del New Lansdowne Road Stadium (Figura 2.1.1. y 2.1.2.), rodeado en su perímetro por calles, casas a norte y sur y las vías de tren en el límite occidental (Figura 2.1.3.). Estas restricciones requirieron que el equipo de diseño desarrollara una metodología específica de diseño y construcción para el proyecto.



Figura 2.1.1. New Lansdowne Road Stadium poco tiempo antes de ser demolido.



Figura 2.1.3. Vista panorámica de la ubicación del Aviva Stadium.

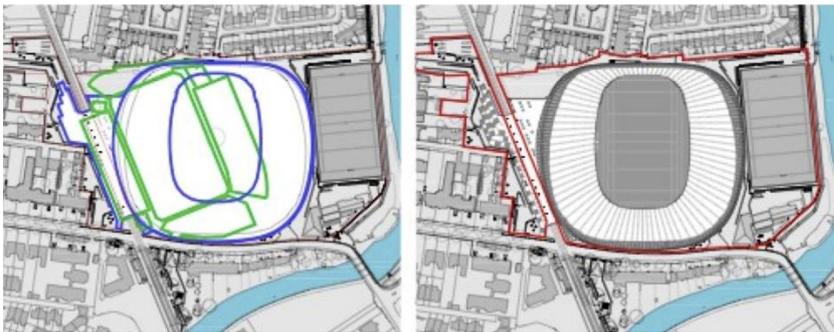


Figura 2.1.2. Diagrama de situación del nuevo estadio (azul) sobre la huella del antiguo (verde).

Es el primer estadio diseñado desde su inicio con un software de modelado paramétrico. Gracias a esto todo el trabajo se realizó sobre un único modelo en el que colaboraron arquitectos e ingenieros, permitiendo optimizar la forma, estructura y envolvente en el diseño de manera simultánea. Al reducir la cantidad de iteraciones a realizar sobre el diseño se consiguió una exploración más detallada de las posibles opciones además de la identificación y resolución de problemas de manera temprana. Este software se utilizó tanto para el análisis estructural como para automatizar la fabricación.

El diseño del estadio fue desarrollado pensando en el confort de los asistentes, así como en el respeto por el entorno más próximo. Por ello la fachada del mismo no es uniforme, sino que se adapta a las condiciones concretas de cada una de las zonas, tanto interiores como con respecto al entorno. Las gradas este y oeste se elevan para ofrecer a la mayoría de los espectadores los mejores ángulos de visión, mientras que en las situadas en los extremos norte y sur esta se reduce para minimizar el impacto en las áreas residenciales (Figura 2.1.4. y 2.1.5.). Además, se impuso una continuidad entre fachada y cubierta

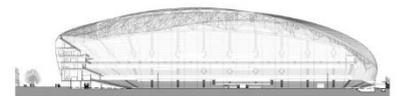


Figura 2.1.4. Sección longitudinal.



Figura 2.1.5. Sección transversal.

creando una forma orgánica translúcida, que permite la entrada de la máxima cantidad de luz diurna posible en los niveles del graderío y minimiza la proyección de sombra del estadio sobre las áreas residenciales cercanas.

El método de trabajo aplicado para el diseño de este proyecto comenzó creando un modelo 3D en el software Bentley's Generative Components (GC) (Figura 2.1.6.), que supuso la base para el diseño de la fachada y la estructura de la cubierta. El trabajo se llevó a cabo de forma conjunta entre los arquitectos, quienes dieron forma a esta piel, y los ingenieros, que diseñaron la estructura que la soportaba. Se desarrolló un proceso de trabajo colaborativo, mediante el cual la información estaba en continua conexión entre ambas partes.

Para lograr esto, se creó un solo archivo de modelado, que hacía referencia a una hoja de cálculo Excel externa que contenía los parámetros iniciales. Dado que la base de ambos modelos depende de la entrada de un único documento Excel, ambas partes podían trabajar simultáneamente en el modelo en diferentes oficinas y, de esta forma, el diseño completo de forma, estructura y envoltivo podría modificarse alterando los parámetros definidos en Excel, lo que significa la simplificación y optimización de la coordinación entre todas las partes.

Esto permitió un intercambio bidireccional completo de información entre ingenieros y arquitectos de modo que los efectos generados en la estructura producidos por los cambios en la envoltivo del edificio pudieran evaluarse rápidamente. De esta forma el modelo estructural podría recalcularse actualizando los parámetros que reflejen los cambios arquitectónicos.

Este enfoque permite a especialistas independientes trabajar en diferentes niveles de detalle simultáneamente, ya que todos están vinculados al mismo modelo de construcción (Figura 2.1.7.).

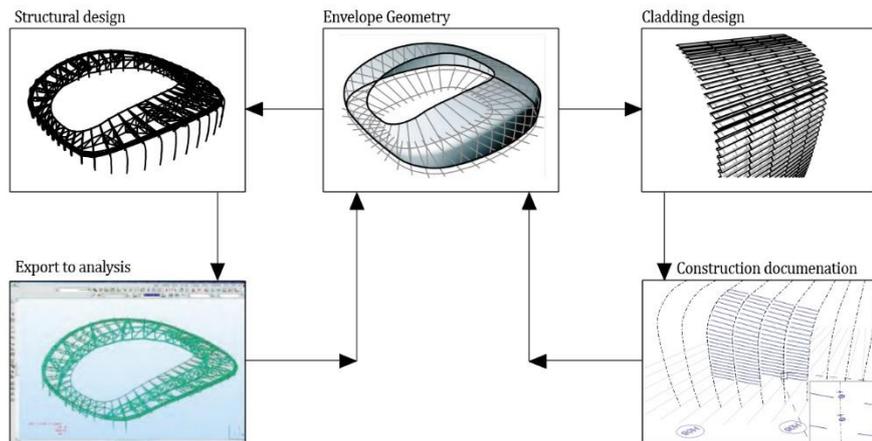


Figura .1.7. Proceso de diseño colaborativo.

Una de las ventajas de poder abordar el modelo simultáneamente en diferentes niveles de detalle es que cualquier modificación se aplique sobre todo el modelo cuando existe un requerimiento posterior para realizar un cambio de diseño significativo. Por ejemplo, en este caso fue necesario ajustar el tamaño de la huella del estadio debido a la profundidad del sistema de revestimiento y para asegurar

que el volumen del edificio se maximizara, pero sin exceder los límites del sitio. La profundidad del conjunto de revestimiento era desconocida al inicio del proceso de diseño, por lo que este cambio de diseño hubo de realizarse una vez que se disponía de información relevante y el proceso global ya estaba en marcha.

DEFINICIÓN DE LA “FORMA”

Para realizar el modelado de la geometría de la envolvente del estadio se necesitaron tres componentes: parámetros numéricos, archivos de geometría y un código de diseño. Los parámetros, o datos numéricos, se almacenaron en una hoja de cálculo de Excel y se iban leyendo en GC a medida que se ejecutaba el código. La geometría se referenciaba desde archivos de tipo CAD. A partir de estos datos iniciales y siguiendo las reglas definidas en el código, se construyó un proceso de diseño gráfico que definió la configuración de la geometría del estadio.

El primer paso fue importar un archivo CAD que contenía una retícula radial correspondiente a la estructura en la que quedaba dividido el proyecto (*Figura 2.1.8.a.*). A partir de esta, 8 arcos tangentes modelados paramétricamente definían la huella del estadio (*Figura 2.1.8.b.*). Este mismo sistema se utilizó para definir el perímetro interior de la cubierta (*Figura 2.1.8.c.*). En la intersección de la huella y la retícula comenzarían los montantes perpendiculares (*Figura 2.1.8.d.*). Cada uno de ellos quedaba definido por una línea recta y dos arcos tangentes (*Figura 2.1.8.e.*) definidos mediante tres curvas planas de control (*Figura 2.1.8.f.*). Construidas todas las curvas se conforma la superficie de la envolvente sobre ellas (*Figura 2.1.8.g.*). Finalmente, se subdividió la estructura principal de modo que la envolvente tuviese más puntos de apoyo y ofreciese mayor flexibilidad a la hora de modificar su sección (*Figura 2.1.8.h.*).

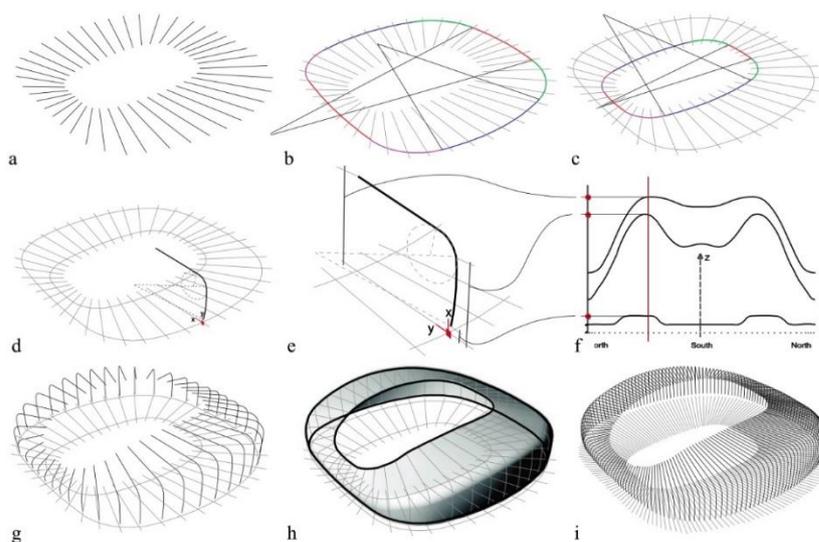


Figura 1.8. Definición geométrica.

A su vez, el equipo de ingenieros se encargó de definir la estructura para la envolvente usando el mismo modelo paramétrico basado en el Excel. Gracias a esto, cuando la estructura estuvo completada fue relativamente sencillo integrarla en el modelo.

Estos recibieron una definición paramétrica de la geometría de la envolvente como un archivo de código de GC, junto con una hoja de cálculo que contenía el conjunto de parámetros numéricos de entrada, así pues, la definición estructural se realizó sobre el mismo modelo paramétrico y se utilizó la definición de envolvente como su base.

En el caso de variar estos datos de entrada, el modelo estructural los cargaría de nuevo y definiría una nueva geometría de la estructura basada en la envolvente actualizada.

La estructura (*Figura 2.1.9.*) estaba compuesta en primer lugar por unos elementos principales (rojo) en forma de herradura que soportaba la cubierta. Haciendo referencia al diseño, la zona abierta de la herradura se colocó más baja que el resto, de modo que esta descansaba sobre los pilares dirigiendo su carga directamente al suelo. El resto se apoya sobre una gran estructura radial secundaria (verde) que recoge la carga vertical y la transfiere a las columnas situadas en el perímetro del estadio. Y a su vez aparece una tercera estructura radial más pequeña (azul) que soporta la carga de la cubierta entre las armaduras secundarias y la reparten sobre la estructura principal y una estructura exterior (gris).

Además de los beneficios del uso de GC en términos de coordinación y simplicidad de modificación, el modelo paramétrico sirvió para optimizar el material utilizado en la estructura.

Para evitar aumentar la sección de toda la estructura terciaria, se optimizó el diseño de modo que la profundidad de la armadura variase a lo largo de su longitud, siguiendo el diagrama de momento flector, obteniendo como resultado una geometría más ancha en los puntos donde su momento flector era mayor. Gracias a esto el modelo paramétrico definió por completo la estructura portante optimizando el material utilizado (*Figura 2.1.10.* y *2.1.11.*).

El punto de partida para el diseño del revestimiento fue la misma retícula radial utilizada para la estructura de la envolvente (*Figura 2.1.8.g.*). Puesto que la separación entre los elementos estructurales era excesiva se requirió la creación de una subestructura para soportar el revestimiento entre los tramos estructurales (*Figura 2.1.8.i.*). Cada uno de ellos se dividió en tres, cuatro o cinco tramos.

En primer lugar, se definió una estrategia de revestimiento simplificada que consistía en paneles de cuatro lados que seguían la geometría subyacente.

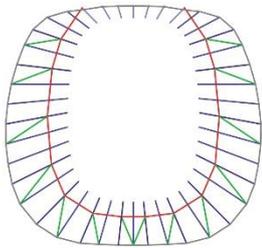


Figura 2.1.9. Diagrama estructural esquemático.

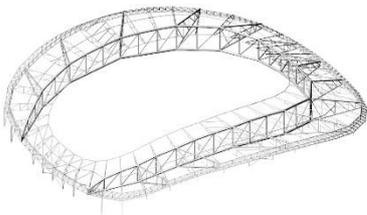


Figura .1.10. Representación axonométrica de los elementos estructurales.



Figura 2.1.11. Construcción del estadio.

Gracias al diseño paramétrico se exploraron varias versiones diferentes que incluían paneles planos y torsionados. Se crearon diferentes modelos paramétricos rápidamente que permitieron tomar decisiones con respecto a la apariencia final del modelo (*Figura 2.1.12.*).

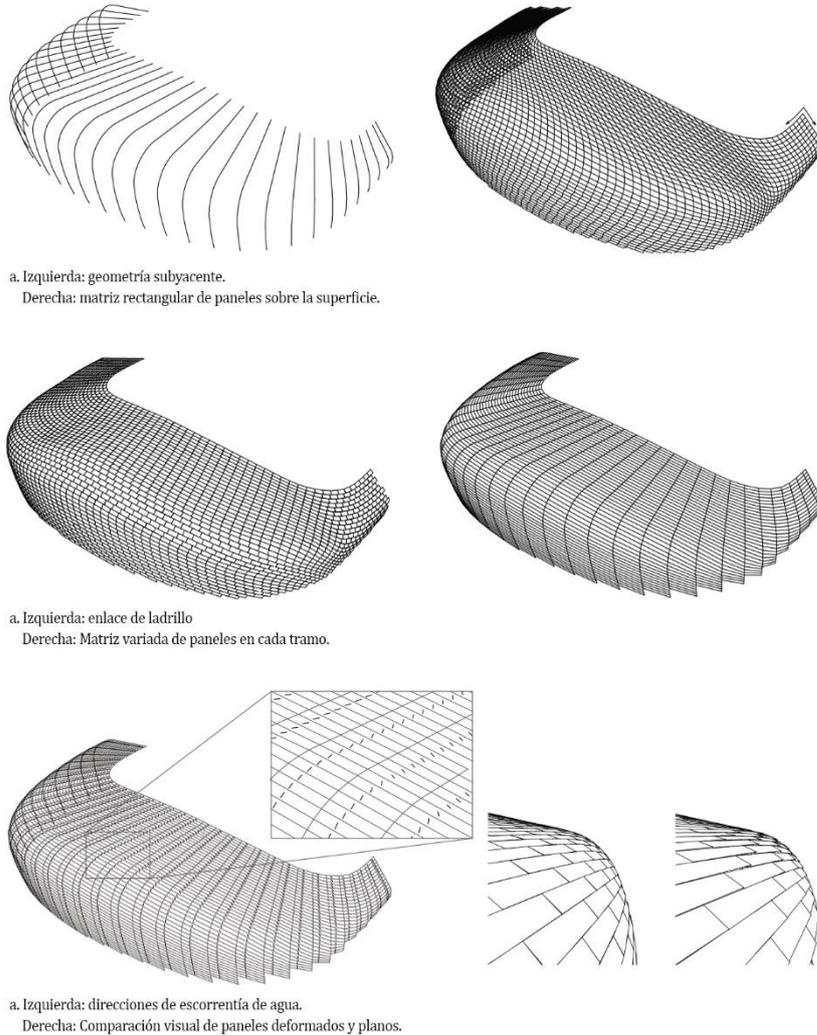


Figura 2.1.12. Diferentes configuraciones geométricas de la envolvente.

El uso de un solo modelo paramétrico en un equipo multidisciplinar y la posibilidad de compartir datos de manera inteligente con software de análisis de ingeniería y procesos de fabricación ha llevado a un diseño eficiente y optimizado. El modelo se creó partiendo del diseño inicial de los arquitectos, lo que permitía al resto de implicados responder de inmediato a los cambios producidos en la forma sin tener que perder más tiempo reconstruyendo.



Figura 2.1.13. Detalle de los paneles de la envolvente exterior.

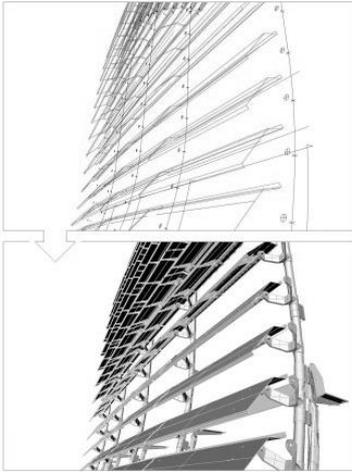


Figura 2.1.14. Detalle de los paneles de la envolvente exterior.

El diseño y construcción del Aviva Stadium fue el primero de una nueva era en el diseño de estadios, donde se pueden diseñar y construir formas curvas complejas utilizando un software de diseño paramétrico. Este modelo aportó al diseño y a la construcción numerosos avances:

- Desarrolla una geometría optimizada que unifica estructura y envolvente, combinando la fachada y la cubierta, de manera que se optimizan ambas y se consigue, por ejemplo, un gran aprovechamiento de iluminación natural y visuales sin obstrucción.
- Establece un flujo de trabajo paramétrico coordinado e interdependiente entre arquitectos, ingenieros y desarrolladores de elementos de fachada. De esta manera, el proceso de diseño deja de ser unidireccional, donde unos equipos trabajan después de otros, para ser colaborativo, trabajando simultáneamente y permitiendo así unificar y optimizar las decisiones tomadas en cuanto al resultado final conociendo de antemano los distintos condicionantes.
- Emplea un sistema constructivo de elementos de fachada que permiten la variación constante, gradual y localizada de acuerdo a requerimientos técnicos de la edificación (ventilación, estanqueidad). Un eje lateral de rotación permite fijar los paneles en un rango de posiciones entreabierto y cerrado. Esto posibilita que las secciones de la fachada se abran para permitir la entrada y salida de aire (*Figuras 2.1.13., 2.1.14.*)

Este proyecto contribuye a reafirmar la idea de que el método de diseño paramétrico ayuda a definir uno de los tres aspectos fundamentales de la arquitectura, la forma del proyecto.

2.2 SERPENTINE GALLERY PAVILION 2005. ÁLVARO SIZA Y EDUARDO SOUTO DE MOURA.

Desde que en el año 2000 se construyese por primera vez el Serpentine Gallery Pavilion, en Kensington Gardens, Londres, se han visto diferentes tipos de arquitectura temporal que han explorado diversas formas, materiales y estructuras. El carácter temporal de las construcciones permite ver la aplicación del proceso paramétrico en el diseño de estructuras.

La Serpentine Gallery, considerada uno de los principales centros de arte contemporáneo, ofrece cada año a un arquitecto que todavía no haya realizado un edificio en el Reino Unido la oportunidad de mostrar sus ideas más experimentales a través de un pabellón temporal. Este encargo se realiza en enero y debe estar listo para su apertura a partir de junio.

Las bases son siempre las mismas: debe de ser un pabellón de 300m² situado en el lado este de la galería con capacidad para 200 personas que se pueda utilizar como cafetería y espacio para reuniones, espacio para debates, aprendizaje y entretenimiento tanto por el día como por la noche (*Figura 2.2.1.*). Además, puesto que se trata de una exposición temporal, otro de los requisitos que debe cumplir es que sea una estructura desmontable. Tras su exposición, los pabellones se desmontan y se trasladan a una nueva ubicación, por lo que podemos considerar que sólo la ubicación original de los Serpentine Gallery Pavilions es efímera; no así su arquitectura, que tendrá que perdurar en su emplazamiento definitivo, premisa que deberán tener en cuenta a la hora de diseñarlos y motivo por el cual el diseño paramétrico es fundamental.

En el año 2005, fueron los arquitectos portugueses Álvaro Siza y Eduardo Souto de Moura los elegidos para diseñar el proyecto anual para el Serpentine Gallery Pavilion (*Figura 2.2.2.*). Para ello se asociaron con Cecil Balmond, ingeniero estructural de la firma Arup, quien trabajó en la innovadora solución estructural requerida.

Los arquitectos buscaron garantizar que el nuevo edificio, a partir de una arquitectura totalmente diferente, estableciera un diálogo tanto con la construcción neoclásica del edificio principal de la Serpentine Gallery como con el parque circundante. Para acentuar esta relación se utilizó una estructura de madera que reflejaba la escala doméstica de la Serpentine, articulando el paisaje entre los dos edificios.

Aunque este proyecto se considera un proyecto de arquitectura digital, durante sus inicios Siza y Souto de Moura todavía emplearon herramientas de diseño convencional, el dibujo a mano. Son estos primeros bocetos de Siza (*Figura 2.2.3.*) los que muestran la intención de crear un fino caparazón formado por una retícula rectangular simple que se distorsionaba para crear una forma curva dinámica,



Figura 2.2.1. Cafetería interior del Serpentine Gallery Pavilion.

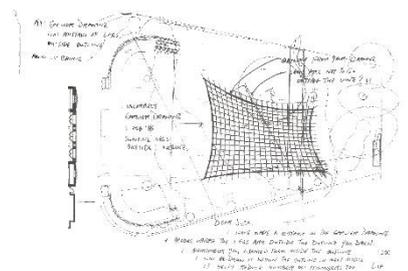


Figura 2.2.2. Plano de situación respecto a la Serpentine Gallery.

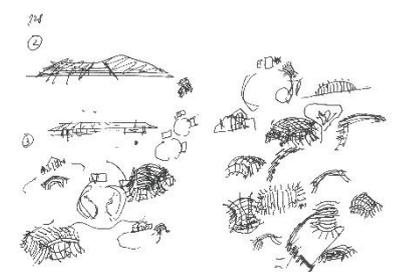


Figura 2.2.3. Bocetos de Siza en los que refleja la idea de caparazón.

orgánica. A partir de estos primeros croquis el equipo de Arup desarrolló el diseño apoyándose en el uso de tecnología avanzada.

La estructura creada se trataba de un gran pabellón de madera, sin columnas, basado en una cuadrícula rectangular simple, que se distorsionaba para crear una forma ondulada. Como Nevile (sf) explica:

“It was created as an evolution of the 'lamella' barrel-vault roofs developed in Germany in the early 1920s. While traditional lamellas were built from identical elements, however, each element of the pavilion is unique, having a different length and inclination. This geometric freedom enables the precise expression of the complex form demanded by the architects.” [Fue creado como una evolución de las bóvedas de cañón' desarrolladas en Alemania en los años 20. Mientras que las bóvedas tradicionales fueron construidas con elementos idénticos, cada elemento de este pabellón es único, con una longitud e inclinación diferentes. esta libertad geométrica permite la expresión precisa de la forma demandada por los arquitectos.] (Citado en Jodidio (2011)).

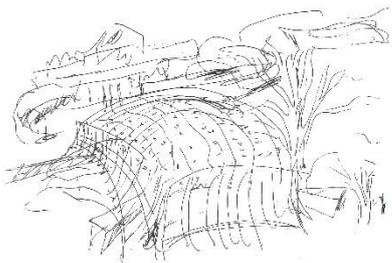


Figura 2.2.4. Boceto en el que se muestra la intención de continuidad.

Los muros y el techo se conforman a partir de una estructura continua (Figura 2.2.4), que deriva de una cuadrícula ondulada de vigas de madera, en la que todos los elementos se entrelazan entre sí mediante juntas convencionales de mortaja y espiga. Sobre esta estructura se encuentra un revestimiento de 348 paneles de policarbonato translúcido, sobre 250 de los cuales se sitúa una iluminación alimentada por energía solar (Figura .2.5).



Figura 2.2.5. Luminarias alimentadas por energía solar.

A pesar de la sencillez aparente del pabellón el interés de los arquitectos por alterar la cuadrícula genera una geometría compleja (Figura .2.6 y 6.2.27). Esa alteración se tradujo en una solución en la que cada elemento era diferente al anterior. Como consecuencia fueron necesarios complejos cálculos, por lo que el pabellón se valió de diversas técnicas digitales que diseñen el soporte necesario a los mismos.

Tomando como origen los bocetos desarrollados por Siza y Souto de Moura, Cecil Balmond, junto a su equipo en Arup, desarrolló los esquemas estructurales para el pabellón usando el software Oasys GSA, consiguiendo llevar a cabo la estructura buscada.

Partiendo de la definición de la geometría, el diseño acaba componiéndose por 427 vigas de madera diferentes, fruto de la distorsión de la cuadrícula; cada una de dichas vigas tiene una inclinación y longitud diferentes, por tanto, Arup tuvo que definir el tamaño exacto de cada una de ellas. Esto se llevó a cabo mediante la creación de un código en Oasys GSA que generó, a partir de sus coordenadas XYZ, 36 puntos para cada viga.

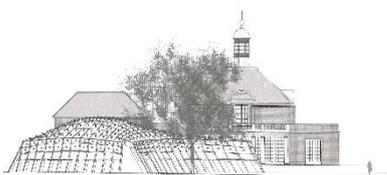


Figura 2.2.6. Alzado principal.



Figura 2.2.7. Alzados.

Tras la definición de estos puntos, el código comprobaría la geometría de cada elemento, teniendo en cuenta su posición respecto de los puntos cercanos. Además, por la necesidad de conocer los esfuerzos concretos de cada una de las vigas y de los nodos que las unen, se estableció un conjunto de reglas que asegurasen que todas las vigas de madera encajaban perfectamente en el sistema de entrelazado. Una vez generadas las geometrías exactas, se realizó un análisis estructural de cada elemento de madera para verificar la robustez de la estructura de la retícula.

Además de definir la geometría, el proceso paramétrico se aplicó también en la fabricación. Tras obtener todas las geometrías digitalmente, se proporcionan los datos a Finnforest Merk a través de objetos tridimensionales en archivos .dxf y en archivos de texto que contenían las coordenadas XYZ. Con ellos se genera una gran base de datos que sería la que determinase las instrucciones de CNC (Computer Numerical Control) para el proceso de fabricación.

Todas las vigas de madera fueron fabricadas utilizando robots (usados normalmente para la fabricación de vehículos) por la empresa Finnforest Merk en Aichach, Alemania. Para ello, la base de datos se traduce a las instrucciones de fabricación legibles por la máquina. Esta máquina se conecta con el brazo robótico que finalmente realiza el corte.

Este tipo de fabricación mediante robots fue realmente importante en un proyecto arquitectónico como el del Serpentine Gallery Pavilion 2005 ya que además de tener que fabricarse en poco tiempo, necesitaba una gran precisión y tenía poca tolerancia al error.

Gracias a la parametrización de este diseño, la instalación de las vigas de madera se realizó en tan solo un mes y con solo diez operarios trabajando en obra (*Figura 2.2.8. y 2.2.9.*). Al prefabricar todos los materiales con anterioridad y tener un control exhaustivo en forma de base de datos del proyecto, aumentó la eficiencia durante la etapa de construcción, siendo necesario tan sólo un pequeño grupo de trabajos in situ; consumió menos tiempo de construcción y no hubo necesidad de llevar máquinas pesadas.

Debido a la estructura entrelazada y a la gran cantidad de elementos diferentes de los que se componía el pabellón, 427 tamaños diferentes de maderas, tuvo que definirse una secuencia de montaje bien definida. Esta empezaba por una esquina y se extendía hasta la esquina opuesta. Para ello el etiquetado tras su fabricación fue crucial, cada elemento fue etiquetado con la referencia de rejilla estructural que le correspondía, lo que permitió determinar fácilmente la ubicación de cada madera en la secuencia de montaje. Gracias a esto se consiguió que, al llegar al final del proceso de ensamblaje, todas las vigas de madera se hubiesen ajustado perfectamente sin tener que realizar ninguna modificación in situ.



Figura 2.2.8 Imagen exterior del pabellón terminado.



Figura 2.2.9. Imagen exterior del pabellón terminado.

Viendo los distintos procesos descritos queda claro que la arquitectura digital juega un papel central en el diseño del proyecto: sin las herramientas informáticas utilizadas no se habría podido llegar a la geometría precisa de la forma pensada por los arquitectos, garantizando una precisión en cada uno de los elementos y las fases del proceso que permiten realizar un proyecto así de complejo en apenas 6 meses.

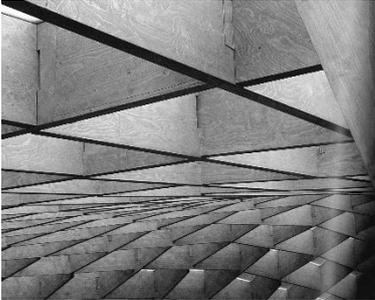


Figura 6.2.10. Detalle de unión entre los diferentes elementos que conforman la estructura.

Como ya se ha explicado, el Serpentine Gallery Pavilion debía diseñarse como una estructura desmontable, ya que abandonaría su ubicación tras el verano para situarse en otro lugar. En respuesta a este requerimiento, Siza y Souto solo usaron juntas de mortaja y espiga, evitando cualquier conexión fija (*Figura 2.2.10.*). Mediante el uso de este método de conexiones, el pabellón podría ensamblarse y desensamblarse rápidamente, siguiendo la secuencia correcta para evitar el colapso. La aplicación del diseño paramétrico en este caso refleja la facilidad con la que al modificar los parámetros de entrada se podría repensar la estructura para situarse en otro lugar con unas condiciones diferentes.

Por último, otra de las ventajas del proceso paramétrico es la posibilidad de trabajar en un mismo proyecto diferentes trabajadores y desde diferentes lugares.

La arquitectura no es un campo independiente, sino que tiene que colaborar con otros especialistas de diferentes áreas. En este pabellón, podemos ver como una buena colaboración entre arquitectos e ingenieros dio lugar a un edificio notable. Fue diseñado en Portugal por Siza y Souto de Moura, Balmond desde Inglaterra llevó a cabo el estudio de la estructura necesaria y se fabricó en Alemania. Con el surgimiento de la tecnología, el lugar se vuelve insignificante.

Gracias a esta combinación podemos decir que el Serpentine Gallery Pavilion 2005 es el resultado de la combinación entre la estética y creatividad de la arquitectura, la innovación de la ingeniería y la evolución de la tecnología digital.

Vemos como el método de diseño paramétrico facilita la definición de la compleja estructura necesaria para llevar a cabo las intenciones reflejadas por los arquitectos en sus bocetos iniciales.

2.3 ELBPHILARMONIE DE HAMBURGO. 2017. JACQUES HERZOG Y PIERRE DE MEURON.

Una de las novedosas aplicaciones del método de diseño paramétrico en la arquitectura es la mejora del confort en los espacios. La arquitectura debe prestar especial atención a la funcionalidad para la que está diseñado el proyecto. Por ello debe preocuparse del confort para el usuario, siendo su acústica uno de los principales aspectos a tener en cuenta al realizar un proyecto, especialmente si se trata de una sala de conciertos como es el caso de este ejemplo. En función del factor de forma, materiales y dimensiones del recinto en el que uno se encuentre, escuchará la música de un modo u otro y, por tanto, tendrá mejor o peor acústica.

Sobre un gran almacén de ladrillo, los arquitectos Jacques Herzog y Pierre de Meuron sitúan el cuerpo donde se alberga la Elbphilharmonie de Hamburgo. Estos en colaboración con Yasuhisa Toyota, uno de los mayores expertos mundiales en acústica, y Ben Koren, ingeniero de One to One, han diseñado la primera sala de conciertos con una acústica perfecta. Siendo este uno de los mejores ejemplos de las posibilidades del diseño paramétrico.

Para conocer un poco más el proyecto y antes de llegar al proceso de diseño introduciremos el tema a tratar analizando los factores que más puedan influir en el diseño de un recinto de este tipo. Existen diversos parámetros que un arquitecto debería tener en cuenta a la hora de diseñar un espacio para música:

- Parámetros físicos. Un sonido se caracteriza por su altura, timbre, intensidad y duración, pudiendo clasificarse como largo o corto, fuerte o débil, agudo o grave.
- Reflexión del sonido y tiempo de reverberación. El tiempo de reverberación cuantifica la reverberación de un espacio, es decir cuánto tardan las ondas reflejadas en desaparecer. Esta puede ser controlada e incluso dirigida mediante los paramentos y la geometría del espacio.
- Tecnología. En función de los materiales utilizados y del tipo de música reproducida las soluciones serán diferentes.
- Geometría. Elemento en el que más influye el arquitecto. La disposición de los elementos elegida por los arquitectos a la hora de proyectar influirá en la recepción del sonido del oyente. Uno de los aspectos más importantes es la situación del escenario con respecto a los espectadores.

Como se ve, son múltiples factores interrelacionados los que acabarán definiendo la calidad acústica de un espacio para todos y cada uno de los sonidos que se emitirán y para todas y cada una de las posiciones desde las que se recibirán; el cálculo y diseño acústico de una sala de conciertos, auditorio o cualquier otro recinto con



Figura 3.1. Preexistencia sobre la que se sitúa la Filarmónica de Elba.



Figura 3.2. Filarmónica de Elba.

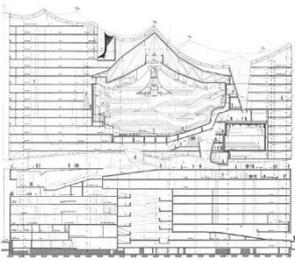


Figura 3.3. Sección longitudinal de la preexistencia y el nuevo proyecto.



Figura 2.3.4. Exterior de la filarmónica de Berlín



Figura 2.3.5. Puerto de la ciudad de Hamburgo donde se ubica el proyecto.

exigencias acústicas es posiblemente uno de los más complejos de realizar de manera manual; es por ello que se puede plantear que todos estos rasgos se considerasen parámetros a introducir en un hipotético diseño paramétrico.

Tras realizar este análisis general de los factores que pueden afectar en el diseño de un auditorio, vemos como se ha aplicado en este caso de estudio.

Sobre el Kaispeicher (*Figura 2.3.1.*), un edificio de ladrillo construido en la década de los 60 en el puerto de Hamburgo se sitúa el cuerpo donde se alberga la Filarmónica de Elba o Elbphilharmonie de Hamburgo (*Figura 2.3.2.*). La capacidad portante de este almacén en desuso, diseñado para aguantar toneladas de granos de cacao, asume la labor de resistir el peso de esta nueva construcción. Siendo así un ejemplo de inserción de una arquitectura sobre una preexistencia, dotándola de una vida nueva. Se puede considerar un nuevo centro cultural, cuyo objetivo es atraer al público a una nueva idea de arquitectura musical además de hacerla atractiva.

Se trata de un nuevo concepto de auditorio en el que combina espacios de distintos usos bajo el mismo edificio. La sala para la Filarmónica, con capacidad para 2100 personas y el salón de música de cámara para 550 comparten espacio con restaurantes, bares, apartamentos, aparcamientos y un hotel (*Figura 2.3.3.*). A diferencia de otros edificios de uso similar, este no sólo se habita cuando hay conciertos, sino que busca convertirse en un punto de referencia junto al puerto de Hamburgo.

La idea llevada a cabo por los arquitectos parte del concepto de reinventar el modelo utilizado por Scharoun en los años 60 para la Filarmónica de Berlín (*Figura 2.3.4.*), adecuándolo al tiempo, siglo XXI; y a la ubicación del proyecto, un puerto (*Figura 2.3.5.*).

Al igual que en la de Berlín, se utiliza la tipología circular o “arena” (*Figuras 2.3.6 y 2.3.7.*), el escenario se sitúa en el centro y está rodeado en su perímetro por el público, quienes se aprovechan de las características visuales y acústicas de esta ubicación, mientras que los palcos se sitúan alrededor del escenario en formato aterrazado.

El auditorio central es la pieza principal del proyecto y la más grande de entre los 3 recintos de conciertos de los que dispone el edificio. Sus paredes están compuestas por 10.000 paneles acústicos diferentes de fibra de yeso (*Figura 2.3.8. y 2.3.9.*). Cada uno de ellos contiene un millón de “células” de dimensiones variables, creadas para mejorar la reflexión del sonido.

La comparación entre estos dos proyectos con la misma funcionalidad nos permite ver cómo partiendo de una misma tipología, el diseño paramétrico contribuye a mejorar la acústica del espacio.

Esto es debido al estudio individualizado que aporta el método de diseño paramétrico frente al tradicional.

Para diseñar estos paneles, Yasuhisa Toyota tuvo que tener en cuenta aspectos físicos, pero también cumplir unos criterios de estética establecidos por los arquitectos. Por una parte, los paneles de la zona posterior del auditorio debían poder absorber los ecos, por lo que se dispusieron surcos más grandes y profundos; mientras que los más cercanos a la fuente emisora debían rebotarlo y por ello contenían surcos menos profundos. Además, tenían que ser estéticos y respetar el espacio del público, por lo que los que estuviesen situados más próximos debían ser más suaves.

Partiendo del mapa de sonidos creado por Toyota y las características definidas por los arquitectos, Ben Koren desarrolló paramétricamente estos paneles. Según Koren (2017):

That's the power of parametric design, once all of that is in place, I hit play and it creates a million cells, all different and all based on these parameters. I have 100 percent control over setting up the algorithm, and then I have no more control" [Ese es el poder del diseño paramétrico. Una vez establecidos los condicionantes, tan sólo hay que dar al play y ver como el ordenador crea millones de células, todas diferentes y basadas en esos parámetros. Tengo el control total del algoritmo, y nada más] (Citado en Stinson, L. (2017)).

A pesar de esta aparente falta de control, se trata de un proceso muy práctico y estético, puesto que genera todos los paneles invirtiendo mucho menos tiempo del necesario si se hiciese de manera manual, además de mostrar un resultado variado.

Teniendo en cuenta las restricciones y objetivos arriba explicadas, Koren desarrolló un algoritmo que produjo el diseño de los 10.000 paneles diferentes satisfaciendo las especificaciones estéticas y acústicas. Cada uno de esos paneles está compuesto de pequeñas células entre 4 y 16 cm que o bien absorben o dispersan las ondas acústicas y que, al colocarse en conjunto, proporcionan un efecto único gracias al equilibrio en el tiempo de reverberación.

El diseño paramétrico de espacios arquitectónicos regidos por la influencia de la acústica se ha desarrollado principalmente de dos formas diferentes:

- Para la generación de la forma de los espacios, se parametriza la acción, reflejo y reverberación de los sonidos en los paramentos horizontales y verticales y se adapta el modelo para conseguir una mayor eficiencia acústica en dicho recinto.

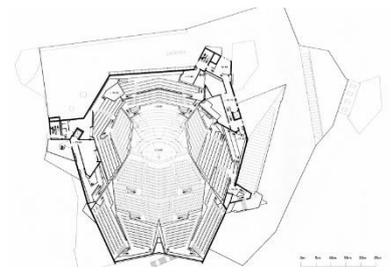


Figura 2.3.6. Configuración en planta de la Filarmónica de Berlín.

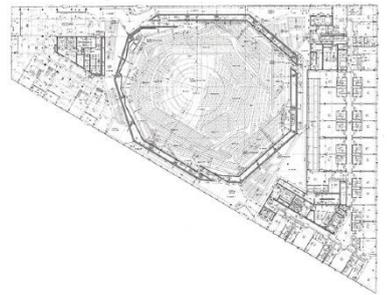


Figura 2.3.7. Configuración en planta de la Filarmónica de Hamburgo.

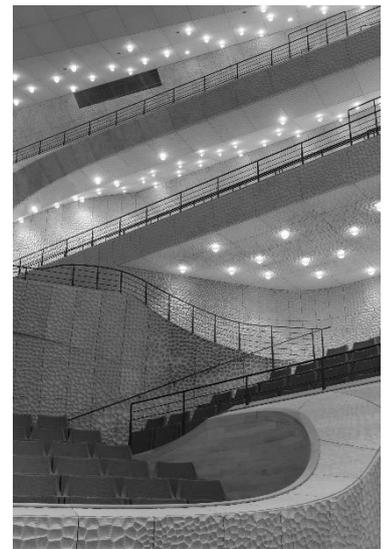


Figura 2.3.8. Paredes interiores configuradas a partir de estas células.

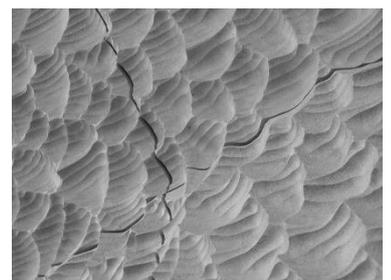


Figura 2.3.9. Detalle de los paneles del interior de la sala

- Por otro lado, el diseño paramétrico ayuda a la creación de elementos constructivos que funcionen de manera más apropiada acústicamente, como por ejemplo los paneles que Yasuhisa Toyota diseña para este auditorio.

La naturaleza no está compuesta por procesos increíblemente complejos, sino todo lo contrario; reglas muy básicas que se repiten incontables veces para formar procesos, diseños y formas más complejas. Característica que refleja muy bien el diseño de este proyecto.

CAPÍTULO 3

CONCLUSIONES

A lo largo del desarrollo de esta memoria se han analizado las aplicaciones del método de diseño paramétrico para la obtención de los componentes fundamentales de la arquitectura, forma, estructura y función. Donde se pone de manifiesto como su uso aumenta exponencialmente la eficiencia del trabajo.

Siguiendo la estructura del presente trabajo, si nos centramos en cada uno de los aspectos mencionados al inicio y sobre los que versa esta memoria podremos comprobar que el objetivo principal planteado se ha cumplido en cada uno de ellos.

El primer punto sobre el que se ha analizado la eficiencia del método de diseño paramétrico ha sido la definición de la forma, concluyendo que gracias a esta aplicación es más sencillo y rápido responder tanto a las exigencias formales del arquitecto como a las restricciones establecidas por el entorno próximo. El siguiente proyecto ha ayudado a corroborar la idea de que un análisis individualizado de cada uno de los componentes que conforman la estructura permite mayor libertad formal, pudiendo crear cada uno de esos elementos distinto al anterior, una optimización de material, así como una simplificación del proceso de puesta en obra. Por último, el caso de estudio de la Filarmónica de Elba nos muestra como gracias a la utilización de este método podemos realizar un estudio personalizado de cada una de las casuísticas acústicas posibles que se pueden dar dentro de la sala y así conseguir responder a todas ellas proponiendo una solución individual para cada una de ellas, mejorando sustancialmente el objetivo para el que ha sido creado.

Como vemos, podríamos decir que el diseño paramétrico se puede aplicar en todas las fases del diseño, generando una serie de ventajas comunes en todas ellas. Más allá del atributo a tratar en cada uno de los proyectos, el análisis de todos ellos tiene en común numerosas ventajas con respecto al uso de este método frente al método tradicional, entre las que destacan la optimización del tiempo y el esfuerzo dedicado.

Además, la aplicación de este método de diseño convierte los modelos en modelos adaptables y flexibles que evolucionan automáticamente al cambiar las condiciones introducidas inicialmente. Esta capacidad permite por una parte que un cambio en el proyecto no suponga la necesidad de rehacer todo el trabajo y por otra la posibilidad de generar diversas alternativas que nos permitan elegir la más conveniente, lo que se traducirá en una gran reducción del tiempo y coste de producción.

Creo importante destacar que debemos entender la arquitectura paramétrica como un ventajoso método de diseño y no como una arquitectura formalista, como Schumacher establecía en su manifiesto. No obstante, uno de los principales hándicaps de este método de producción se debe a que en todo proceso paramétrico se requiere un profundo conocimiento del Software a utilizar, pero cuando se consigue ese control sobre el programa empiezan a aparecer numerosas posibilidades, gracias a la unión entre diseño y nuevas tecnologías.

En relación a esto, durante la realización de esta memoria se ha podido ver como el diseño paramétrico y sus herramientas tienen un gran potencial, y como en el resto de las tecnologías lo más importante es saber aplicarlas.

CAPÍTULO 4

BIBLIOGRAFÍA

ABONDANO FRANCO, D. H. (2018). "De la arquitectura moderna a la arquitectura digital: La influencia de la revolución industrial y la revolución informacional en la producción y la cultura arquitectónica". Tesis. Barcelona: Universitat Ramon Llull

AISH, R. WOODBURY, R. (2005). Multi-level interaction in Parametric Design. *Computer Science*.

ALEXANDER, C. (1980). *A Pattern Language*. Barcelona: Gustavo Gili.

ALONSO RODRÍGUEZ, M. GALVÁN DESVAUX, N. Y ÁLVARO TORDESILLAS, A. (2016). "De la mente al papel. Nuevas técnicas aplicadas al dibujo de arquitectura" en *XVI Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica*. Universidad de Valladolid. p.453-459.

ALONSO PEREIRA, J. R. (2005). *Introducción a la historia de la arquitectura: de los orígenes al siglo XXI*. Barcelona: Reverté.

ALVAREZ, R., & ROCES, J. (2005). *Introducción al diseño paramétrico*. Oviedo: Textos Universitarios Ediuno.

ARQA. La Elbphilharmonie de Hamburgo. <<https://arqa.com/arquitectura/la-elbphilharmonie-de-hamburgo.html>> [Consulta: 20 de octubre de 2019]

BALMOND, C. (2006). *Serpentine Gallery Pavillion 2005*. Londres: Trolley Books.

CASTELLS, M. (1995). *La ciudad informacional. Tecnologías de la información, estructuración económica y el proceso urbano-regional*. Madrid: Alianza Editorial.

COLOMA, E. Y MESA A. (2012). "La docencia de la representación paramétrica. La Representación Paramétrica y los Procesos no Lineales" en EGA. *Revista de expresión gráfica arquitectónica*, n19, UPV. Valencia, p. 62-71.

DAVIS, D. (2013). *A History of Parametric*. <<https://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/>> [Consulta: 05 de octubre de 2019]

DAUTREMONT, C. et. al. (2019). *Parametric design and BIM, systemic tools for circular architecture*.

DELGADO, P. (2017). "El primer editor gráfico interactivo es de 1963" en ABC Blogs. <<https://abcblogs.abc.es/fahrenheit-451/disenio/el-primer-editor-grafico-interactivo-es-de-1963.html>> [Consulta: 20 de septiembre de 2019]

DEZEEN. "Julia Peyton-Jones interview: Serpentine Pavilion 2005 Alvaro Siza & Eduardo Souto de Moura | Dezeen" en Youtube

<https://www.youtube.com/watch?time_continue=104&v=z2drmrkpPHU&feature=emb_logo> [Consulta: 06 de octubre de 2019]

DI PIERRI, C. (2006). "De la producción masiva a la personalización masiva: los deseos de los consumidores y las nuevas tecnologías como factores modeladores del cambio". *Argos*, 23(44), 21-31.

DUNN, N. (2012). *Proyecto y Construcción Digital en Arquitectura*. Art Blume, S. L.: Barcelona.

DURAND, J. N. L. (1981). *Compendio de lecciones de arquitectura: parte gráfica de los cursos de arquitectura*. Pronaos Editorial: Madrid.

EDO VALERON, R. (2017). *Luces y sombras de los Serpentine Pavilions: Un análisis formal, programático y contextual de los Pabellones de la Serpentine Gallery.*" Trabajo Fin de Grado. Alicante: Universidad de Alicante.

EASTMAN, C. et. al. (2011) *BIM Handbook A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*. John Wiley & Sons, Inc.

"Elbphilharmonie Hamburgo. Herzog & de Meuron" (2017) en Plataforma Arquitectura.
<<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/802863/elbphilharmonie-hamburgo-herzog-and-de-meuron>> [Consulta: Consulta 20 de octubre de 2019]

FERNÁNDEZ ÁLVAREZ, A. J. (2015). *La arquitectura como interfaz. El paradigma informacional en la nueva arquitectura*. Tesis: Universidad de Coruña.

GARCÍA ALVARADO, R. (2013). "Diseño paramétrico en Arquitectura; método, técnicas y aplicaciones." En *Arquisur Revista*. Vol.4, Iss 13, pp20-31

HOBSON, B. (2015). Siza and Souto de Moura's 2005 Serpentine Gallery Pavilion was 'hugely complicated' <<https://www.dezeen.com/2015/11/29/video-interview-alvaro-siza-eduardo-souto-de-moura-2005-serpentine-gallery-pavilion-julia-peyton-jones-movie/>> [Consulta: 06 de octubre de 2019]

HUDSON, R. et. al. (2011) "Aviva Stadium: A case study in integrated parametric design" en *Internal Journal of architectural computing*, edición 02, volume 09, pp. 187-203

IWAMOTO, L. (2009). *Digital Fabrications. Architectural and Material Techniques*. Princeton Architectural Press: New York.

JABI, W. (2013). *Parametric Design for Architecture*. Laurence King Publishing Ltd: London.

- JODIDIO, P. (2011). *Serpentine Gallery Pavilions*. Taschen GmbH.
- KARA, K. Y GEORGOULIAS, A. (2012). *Interdisciplinary design: new lessons from architecture and engineering*.
- LANGDOM, D. (2015). *Clásicos de Arquitectura: Pabellón Alemán, Expo '67 en Plataforma Arquitectura*. <<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/768540/clasicos-de-arquitectura-pabellon-aleman-expo-67-frei-otto-rolf-gutbrod>> [Consulta: 05 de septiembre de 2019]
- LEON, M., & LAING, R. (2013). *Towards a Computer Mediated Methodology for Collaborative Design during the Early Architectural Design Stages*. In: *Proceedings of 2013 IEEE 17th Int. Conf. on Computer Supported Cooperative Work in Design*, Whistler, Canada. 489-495.
- MEREDITH, M. (2008). *From Control to Design: Parametric/Algorithmic Architecture*. Barcelona / New York: Actar-D.
- MITCHELL, W. J. (2007). *Computer-aided Architectural Design*. Van Nost. Reinhold
- MUÑOZ COSME, A. (2017). *Iniciación a la arquitectura*. Barcelona: Reverté.
- NAVARRETE, S. (2014). "El diseño paramétrico. El gran desafío del siglo XXI" en *Cuaderno del Centro de Estudios en Diseño y Comunicación*, nº 49, p.63-72.
- ORTEGA, L. (ed) (2009). *La digitalización toma el mando*. Gustavo Gili S. L.: Barcelona.
- PELLETIER NAVARRO, M. A. (2015). *Hardware de arquitectura paramétrica en hormigón armado*. Proyecto fin de máster. Barcelona.
- PETEINARELIS, A. YIANNOUDES, S. (2016). "Algorithmic thinking in design and construction" en *8th International Conference of the Arab Society of Computer Aided Architectural Design*.
- RODAS RIVERA, S. A. BENAVIDES PADILLA, C. J. (2017). *Introducción al diseño paramétrico: utilización de herramientas digitales para la resolución de superficies complejas mediante la aplicación de algoritmos*. Tesis: Universidad de Cuenca.
- SCHUMACHER, P. (2008) "Parametricism as Style - Parametricist Manifest" en *Dark Side Club, 11th Architecture Biennale, Venice 2008*.
- SCHUMACHER, P. (2010) "The Parametricist Epoch: Let the Style Wars Begin" en *AJ - The Architects' Journal*, Num. 16, Vol. 231.
- SERPENTINE GALLERIES <<https://www.serpentinegalleries.org/>> [Consulta: 06 de octubre de 2019]

SHEPHERD, P. et. al. (2011). "Aviva Stadium: A parametric success" en International journal of architectural computing, edición 02, volumen 09, pp. 167-185.

STINSON, L. (2017). What Happens When Algorithms Design a Concert Hall? The Stunning Elbphilharmonie <<https://www.wired.com/2017/01/happens-algorithms-design-concert-hall-stunning-elbphilharmonie/#>> [Consulta: 10 de octubre de 2019]

TEDESCHI, A. (2011). Architettura parametrica. Introduzione a Grasshopper. Brienza: Le Penseur.

TURRIN, M. SARIYILDIZ, I. S. Y PAUL, J.C. (2015). *Interdisciplinary parametric design: The XXL experience* en International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium "Future Visions". <<http://resolver.tudelft.nl/uuid:84b6e87f-0b4d-424e-a1ad-348ff926576f>>

WALTER, A. (2017). How algorithms designed the sound of the new Hamburg concert hall. <<https://archinect.com/news/article/150025505/how-algorithms-designed-the-sound-of-the-new-hamburg-concert-hall>>[Consulta: 15 de Octubre de 2019]

WOODBURY, R. (2010). Elements of Parametric Design. Taylor & Francis Ltd: United Kingdom.

CAPÍTULO 5

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Figura 1.2.1. Producción mecanizada en fábricas gracias a la Revolución Industrial. Recuperado de <https://okdiario.com/curiosidades/revolucion-industrial-1133864>

Figura 1.2.2. Gracias a la mecanización de los procesos apareció la producción en masa. Recuperado de <http://produccionindustrial2016.blogspot.com/2016/03/ejemplos-de-produccion-en-serie-y-por.html>

Figura 1.2.3. Escuela de arquitectura Bauhaus fundada en 1919. Recuperado de http://www.diariodevalladolid.es/noticias/valladolid/patio-herreriano-celebra-centenario-bauhaus-ciclo-cine_148499.html

Figura 1.2.4. Sistema de medidas Le Modulor de Le Corbusier. Recuperado de <https://www.metalocus.es/es/noticias/dos-minutos-para-explicar-los-principios-de-diseno-de-le-corbusier>

Figura 1.2.5. Museo Guggenheim diseñado por Frank Gehry. Recuperado de <https://www.luisan.net/blog/disenio-grafico/disenio-parametrico>

Figura 1.3.1. Cripta de la Colonia Güell. Antonio Gaudí. Recuperado de <https://www.abc.es/catalunya/barcelona/20140426/abci-arquitectura-diseno-cataluna-golpe-201404251720.html>

Figura 1.3.2. Pabellón Alemán. Frei Otto. Recuperado de <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/768540/clasicos-de-arquitectura-pabellon-aleman-expo-67-frei-otto-rolf-gutbrod>

Figura 1.3.3. Cúpula geodésica. Buckminster Fuller. Recuperado de <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/758384/clasicos-de-arquitectura-biosfera-de-montreal-buckminster-fuller>

Figura 1.13.4. Sketchpad. Ivan Sutherland. Recuperado de <https://en.wikipedia.org/wiki/Sketchpad>

Figura 1.13.5. Estudios de arquitectura previos a la Revolución Digital. Recuperado de <https://archinect.com/news/article/150078470/vintage-photos-remind-of-the-profession-before-autocad>

Figura 1.3.6. Estudios de arquitectura tras la aparición de los ordenadores. Recuperado de <https://officesnapshots.com/2013/01/04/foster-partners-headquarters-office-design/>

Figura 2.1. Imagen exterior del Aviva Stadium diseñado por Populous. Recuperado de https://www.avivastadium.ie/images/uploads/banners/Aviva_banner_8.jpg

Figura 2.2. Imagen exterior del Serpentine Gallery Pavilion diseñado por Siza y Souto de Moura. Recuperado de <https://www.losandes.com.ar/article/view?slug=serpentine-gallery-ano-2005-un-pabellon-contextual>

Figura 2.3. Imagen exterior de la Filarmónica de Elba diseñada por Herzog & de Meuron. Recuperado de BAAN, I. (2017). "Elbphilharmonie Hamburgo. Herzog & de Meuron" (2017) en Plataforma Arquitectura. <<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/802863/elbphilharmonie-hamburgo-herzog-and-de-meuron>> [Consulta: Consulta 20 de octubre de 2019]

Figura 2.1.1. New Lansdowne Road Stadium poco tiempo antes de ser demolido. Recuperado de <https://worsa.wordpress.com/2015/05/19/lansdowne-road-the-worlds-oldest-rugby-arena/>

Figura 2.1.2. Diagrama de situación del nuevo estadio (azul) sobre la huella del antiguo (verde). Recuperado de <https://arc239parametricism.wordpress.com/2014/03/26/aviva-stadium/>

Figura 2.1.3. Vista panorámica de la ubicación del Aviva Stadium. Recuperado de <https://arc239parametricism.wordpress.com/2014/03/26/aviva-stadium/>

Figura 2.1.4. Sección longitudinal. Recuperado de <https://www.solaripedia.com/13/238/Aviva+Stadium+Lets+Sun+Shine+In%2C+Through.html>

Figura 2.1.5. Sección transversal. Recuperado de <https://www.solaripedia.com/13/238/Aviva+Stadium+Lets+Sun+Shine+In%2C+Through.html>

Figura 2.1.6. Software Generative Components. Recuperado de <https://www.bentley.com/es/products/product-line/modeling-and-visualization-software/generativecomponents>

Figura 2.1.7. Proceso de diseño colaborativo. Recuperado de SHEPHERD, P. et. al. (2011). "Aviva Stadium: A parametric success" en International journal of architectural computing, edición 02, volumen 09, p. 171.

Figura 2.1.8. Definición geométrica. Recuperado de SHEPHERD, P. et. al. (2011). "Aviva Stadium: A parametric success" en International journal of architectural computing, edición 02, volumen 09, p. 172.

Figura 2.1.9. Diagrama estructural esquemático. Recuperado de SHEPHERD, P. et. al. (2011). "Aviva Stadium: A parametric success" en International journal of architectural computing, edición 02, volumen 09, p. 173.

Figura 2.1.10. Representación axonométrica de los elementos estructurales. Recuperado de SHEPHERD, P. et. al. (2011). "Aviva Stadium: A parametric success" en International journal of architectural computing, edición 02, volumen 09, p. 174.

Figura 2.1.11. Construcción del estadio. Recuperado de SHEPHERD, P. et. al. (2011). "Aviva Stadium: A parametric success" en International journal of architectural computing, edición 02, volumen 09, p. 183.

Figura 2.1.12. Diferentes configuraciones geométricas de la envolvente. Recuperado de HUDSON, R. et. al. (2011) "Aviva Stadium: A case study in integrated parametric design" en Internal Journal of architectural computing, edición 02, volume 09, p. 193.

Figura 2.1.13. Detalle de los paneles de la envolvente exterior. Recuperado de <https://bit.ly/2q703zz>

Figural 2.1.14. Detalle de los paneles de la envolvente exterior. Recuperado de <https://bit.ly/2QoZnSt>

Figura 2.2.1. Cafetería interior del Serpentine Gallery Pavilion. Recuperado de JODIDIO, P. (2011). Serpentine Gallery Pavilions. Taschen GmbH. p.VI.12

Figura 2.2.2. Plano de situación respecto a la Serpentine Gallery. Recuperado de JODIDIO, P. (2011). Serpentine Gallery Pavilions. Taschen GmbH. p.VI.27

Figura 2.2.3. Bocetos de Siza en los que refleja la idea de caparazón. Recuperado de JODIDIO, P. (2011). Serpentine Gallery Pavilions. Taschen GmbH. p.VI.17

Figura 2.2.4. Boceto en el que se muestra la intención de continuidad. Recuperado de JODIDIO, P. (2011). Serpentine Gallery Pavilions. Taschen GmbH. p.VI.10

Figura 2.2.5. Luminarias alimentadas por energía solar. Recuperado de JODIDIO, P. (2011). Serpentine Gallery Pavilions. Taschen GmbH. p.VI.07

Figura 2.2.6. Alzado principal. Recuperado de JODIDIO, P. (2011). Serpentine Gallery Pavilions. Taschen GmbH. p.VI.31

Figura 2.2.7. Alzados. Recuperado de JODIDIO, P. (2011). Serpentine Gallery Pavilions. Taschen GmbH. p.VI.31

Figura 2.2.8 Imagen exterior del pabellón terminado. Recuperado de JODIDIO, P. (2011). Serpentine Gallery Pavilions. Taschen GmbH.

Figura 2.2.9 Imagen exterior del pabellón terminado. Recuperado de JODIDIO, P. (2011). Serpentine Gallery Pavilions. Taschen GmbH.

Figura 2.2.10. Detalle de unión entre los diferentes elementos que conforman la estructura. Recuperado de JODIDIO, P. (2011). *Serpentine Gallery Pavilions*. Taschen GmbH. p.VI.16

Figura 2.3.1. Preexistencia sobre la que se sitúa la Filarmónica de Elba. Recuperado de <http://www.hamburg-heide-harz.de/fotoalben/hamburg/elbphilharmonie.shtml>

Figura 2.3.2. Filarmónica de Hamburgo. Recuperado de Schulz, M. (2017). "Elbphilharmonie Hamburgo. Herzog & de Meuron" (2017) en Plataforma Arquitectura.

<<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/802863/elbphilharmonie-hamburgo-herzog-and-de-meuron>>

Figura 2.3.3. Sección longitudinal de la preexistencia y el nuevo proyecto. Recuperado de <https://www.metalocus.es/es/noticias/filarmonica-de-hamburgo>

Figura 2.3.4. Exterior de la filarmónica de Berlín. Recuperado de <https://www.metalocus.es/es/noticias/la-filarmonica-de-berlin-historia-y-nuevo-concepto>

Figura 2.3.5. Puerto de la ciudad de Hamburgo donde se ubica el proyecto. Recuperado de BAAN, I. (2017). "Elbphilharmonie Hamburgo. Herzog & de Meuron" (2017) en Plataforma Arquitectura. <<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/802863/elbphilharmonie-hamburgo-herzog-and-de-meuron>>

Figura 2.3.6. Configuración en planta de la Filarmónica de Berlín. Recuperado de <https://www.metalocus.es/es/noticias/la-filarmonica-de-berlin-historia-y-nuevo-concepto>

Figura 2.3.7. Configuración en planta de la Filarmónica de Hamburgo. Recuperado de <https://www.metalocus.es/es/noticias/filarmonica-de-hamburgo>

Figura 2.3.8. Paredes interiores configuradas a partir de estas células. Recuperado de BAAN, I. (2017). "Elbphilharmonie Hamburgo. Herzog & de Meuron" (2017) en Plataforma Arquitectura. <<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/802863/elbphilharmonie-hamburgo-herzog-and-de-meuron>>

Figura 2.3.9. Detalle de los paneles del interior de la sala. Recuperado de <https://culturainquieta.com/es/arte/arquitectura/item/12732-la-nueva-sala-de-la-filarmonica-de-hamburgo-espectacular-y-acusticamente-perfecta.html>