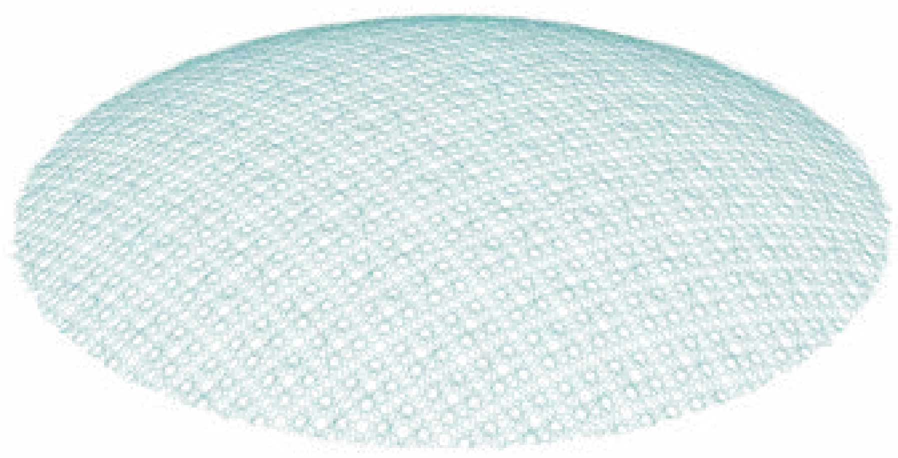
Paula Pérez Cano

Mallas de Luz: Geometría Islámica y Arquitectura Paramétrica



Tutora: Sonia Luisa Rueda Pérez
Aula TFG 5

Universidad Politécnica de Madrid

Escuela Técnica Superior de Arquitectura

Trabajo Fin de Grado

Paula Pérez Cano

Mallas de Luz: Geometría Islámica y Arquitectura Paramétrica

Mallas de Luz: Geometría Islámica y Arquitectura Paramétrica

Estudiante
Paula Pérez Cano
Expediente 20316

Tutora
Sonia Luisa Rueda Pérez
Departamento de Matemática Aplicada

Aula TFG 5
María Barbero Liñán, *coordinador/a*
Jose Antonio Flores Soto, *adjunto/a*

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid
Universidad Politécnica de Madrid

Índice

Resumen

Alberto Campo Baeza cuenta en su curso "Clase magistral de arquitectura" que la luz es el material fundamental de la arquitectura, pero al ser gratis no la valoramos.

La iluminación natural ha desempeñado desde siempre un papel fundamental en la arquitectura tanto por sus cualidades físicas y funcionales, como por sus connotaciones simbólicas. Esto es algo que en la arquitectura islámica se ha manifestado de manera excepcional, traduciéndose en los complejos elementos que constituyen las celosías. A lo largo de la historia, estas piezas se han desarrollado de diversas formas adaptándose a la situación geográfica y materiales disponibles, generando así una rica tradición que, desgraciadamente, no parece tener traducción en la arquitectura contemporánea.

Este Trabajo Fin de Grado propone la metodología para el estudio, adaptación y reinterpretación de las celosías islámicas en superficies desarrollables y no desarrollables, a la vez que reivindica su valor cultural, climático y geométrico. Igualmente, más que proponer soluciones cerradas, se plantea como un punto de partida para futuras líneas de investigación que profundicen en la relación entre tradición y modernidad, haciendo uso de las herramientas actuales de diseño paramétrico y las nuevas posibilidades que estas ofrecen, para hacer una arquitectura contemporánea más consciente de su legado y contexto.

Para ello se investigará la historia y composición geométrica de las celosías islámicas, con el fin de poder analizar y modelar paramétricamente tres obras del estudio Jean Nouvel. Lo aprendido en este proceso permite realizar variaciones del diseño que abren la puerta a investigaciones futuras.

Palabras clave

Celosías · Arquitectura islámica · Arquitectura paramétrica · Grasshopper · Jean Nouvel · Superficies no desarrollables

Introducción

Motivación y objetivos

En mi primer cuatrimestre en la carrera, en otoño de 2020, encontré de casualidad mi pasión por el diseño paramétrico. Esto fue gracias a la asignatura de Taller Experimental 1, donde elegí la opción de "Arquitectura Paramétrica". Aquí aprendí desde muy temprano que existen otras maneras de diseñar y proyectar en donde lo complicado se vuelve sencillo y el "azar" encuentra su lógica. A lo largo de la carrera intenté incorporar estos conocimientos a otras asignaturas y proyectos, pero, desgraciadamente, tuve que ir abandonándolo. Sin embargo, en quinto curso retomé esta ilusión en la asignatura de Intensificación en Modelización Arquitectónica, donde aprendimos a comprender el programa desde el punto de vista matemático y geométrico y eso me animó a querer hacer mi TFG sobre algo relacionado con el diseño paramétrico.

Por otro lado, mi familia me une de manera personal al mundo islámico ya que es andaluza. He crecido cada verano visitando grandes monumentos de herencia islámica, jugando en patios y escondiéndome tras celosías restauradas. Tenemos la enorme suerte de acceder a algo que parece tan lejano, pero que sin embargo nos toca tan de cerca. No se trata de religiones, sino de cómo una gran parte de nuestra población vive y se ha forjado con el tiempo. Hay personas que, como a mí, nos recuerda a casa.

En este trabajo quise unir estos dos intereses: el diseño paramétrico y la arquitectura islámica. El objetivo es traducir los patrones de teselación usados en las celosías islámicas tradicionales a un nuevo diseño actual que respete la herencia de estos elementos y, a la vez, los haga evolucionar gracias a las herramientas paramétricas. Al ser un trabajo de extensión reducida, únicamente se centrará en la transformación de estos patrones desde los soportes planos en los que normalmente se encuentran a otros curvos, junto con los problemas y matices que esto conlleva. Por lo tanto, los objetivos del trabajo se pueden sintetizar en los siguientes puntos.

- Estudiar la historia y evolución de las celosías islámicas para comprender su importancia, así como sus patrones geométricos y leyes matemáticas

- Analizar tres obras de Jean Nouvel para detectar las dificultades que plantea la adaptación de celosías a distintos tipos de superficies

- Diseñar un proceso de modelado de celosías no planas haciendo uso de herramientas de diseño paramétrico

- Aplicar el proceso de modelado de celosías no planas a otras teselaciones y superficies, como punto de partida de posibles líneas de investigación

Metodología

Se comenzará la investigación con un estudio de todas las características de las celosías islámicas: historia, evolución, funciones climáticas y sociales, simbología, etc. Para este apartado se ha realizado una revisión bibliográfica que incluye tanto publicaciones especializadas como trabajos académicos previos (TFG y TFM).

Posteriormente, se estudiarán las teselaciones y su construcción matemática. Esto fue una tarea compleja debido al reducido número de publicaciones que tratan exclusivamente sobre este tema y la falta de coherencia de unas con otras.

En cuanto al estudio de casos, se seleccionarán tres proyectos realizados por el estudio Ateliers Jean Nouvel: el Instituto del Mundo Árabe, el Louvre de Abu Dabi y una torre de oficinas en Doha. En el segundo y tercero se seguirá el mismo proceso: primero, una búsqueda y diseño de la teselación que los forma en plano; segundo, un análisis de la superficie curva, su clasificación y su posible método de adaptación de la teselación; y, por último, una modelización en Grasshopper descrita en el trabajo presente para su posible uso como guía para su reproducción.

Además, al final también se empezarán a plantear otras variaciones de patrón y superficie que abren la puerta a continuar esta investigación que, como ya se ha mencionado, se ha reducido dado al tiempo del que se dispone.

Cabe destacar la novedad del tema elegido y la falta de referencias y bibliografía que se pueden encontrar sobre él. Esto ha hecho que el desarrollo prácticamente íntegro del trabajo sea muy personal e inédito.

1. Celosías Islámicas

1.1 Historia y diseño

Definición

Según la RAE, las celosías se pueden definir como [1]: “Enrejado de listoncillos de madera o hierro, que se pone en las ventanas de los edificios y otros huecos análogos, para que las personas que están en el interior vean sin ser vistas.”

Sin embargo, en la arquitectura islámica este término va mucho más allá. No se trata únicamente de pantallas que separan el exterior del interior, sino soluciones cautivadoras que recogen siglos de historia, matemáticas, física, religión y cultura. Son elementos con la capacidad de distorsionar los límites exterior-interior, jugando con la luz y su característica dinamicidad, así como con los materiales, consiguiendo resultados únicos.

El arte islámico está profundamente relacionado con el Islam, donde es ampliamente conocido que no está admitida la representación iconográfica. Sin embargo, como cuenta Grabar [2], no es tan sencillo como decir que rechazan la iconografía por temor a idolatrar, sino que es posible que se esconda un pensamiento mucho más similar al contemporáneo, basándose en los principios de libertad, abstracción y arbitrariedad.

Evolución y materiales

[3] y [6]: La evolución de las celosías y sus materiales se pueden resumir en los siguientes párrafos:

Aunque el uso de celosías y cerramientos calados era ya comúnmente usado en el Mediterráneo, fue en el arte islámico donde más se desarrolló su uso y complejidad.

El origen de la celosía islámica no se puede datar específicamente ya que el Islam se dilató mucho en el tiempo y espacio, adquiriendo ideas y tradiciones de los lugares a los que llegaba. Las primeras manifestaciones aparecen en la arquitectura omeya (s. VII-VIII) donde se conservan ejemplos de celosías de madera tallada en mezquitas y palacios (fig. 1).

Fig. 1: Celosía omeya, Torre de Comares, Alhambra

Posteriormente, es difícil unificar su evolución ya que la variedad política y cultural tan heterogénea del mundo islámico propició diversas variantes, además del acceso a distintos materiales según la zona geográfica. Cabe destacar los siguientes ejemplos.

Por un lado, la aparición de las *mashrabiyyas* en Egipto y la península arábiga con el Imperio Mameluco (s. XIII-XVI) (fig. 2). Tratan de celosías de madera torneada móviles que se colocaban en balcones y ventanas, permitiendo el paso de la luz y ventilación. Por otro lado, en el Magreb y Al-Ándalus (s. VIII-XV) destacan las celosías realizadas en yeso, un material barato y rápido de trabajar, consecuente con la rápida expansión en estas tierras (fig. 3). Además, cuando el Islam llegó a la India bajo el Imperio Mogol (s. XVI-XIX), se desarrollaron celosías en piedras como el mármol donde adoptaron el nombre de *jaali* (fig. 4). Por último, en el Imperio Safávida en Persia (s. XVI-XVIII) se han encontrado celosías realizadas en cerámica en los tambores de las cúpulas como entrada de luz tamizada.

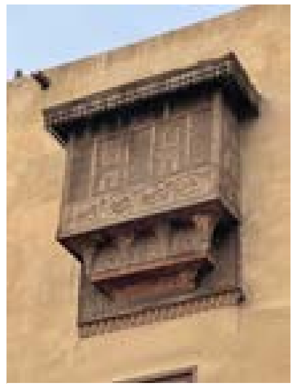


Fig. 2: Mashrabiya

Fig. 3: Celosía de yeso, Alhambra

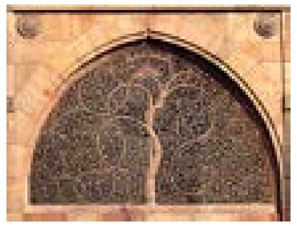


Fig. 4: Jaali, Lal Darwaja

El legado de las celosías islámicas en los siglos XVIII y XIX quedó relegado a obras de poca entidad, jardines y espacios de recreo como quioscos. Poco a poco, en el siglo XX, fueron desapareciendo, tanto de las obras públicas como mezquitas y *madrasas* como de la arquitectura doméstica, debido a la aparición de nuevos materiales y sistemas constructivos.

Actualmente las celosías están recobrando importancia por sus cualidades bioclimáticas, además de retomar la conexión con el pasado cultural de estas sociedades.

Funciones técnicas y sociales

Como ya se avanzaba anteriormente, las celosías islámicas no son meramente separaciones, sino que integran diversas funciones tanto técnicas como sociales y simbólicas.

Desde el punto de vista técnico, la celosía atiende a dos cuestiones fundamentales: el clima y la luz.

La **luz natural** es uno de los materiales más expresivos que se pueden usar en arquitectura. Sin luz no se puede apreciar la arquitectura. Tal como ha explicado mi compañera en [4], su cualidad dinámica provoca cambios en el interior en las tonalidades y texturas. Tiene la capacidad de cambiar el espacio. Esto establece una relación de lo artificial del interior con la naturaleza del exterior.

Además, son varios los estudios actuales sobre neuroarquitectura, consultados en [5], que demuestran el impacto positivo de la luz natural sobre la salud física y mental de las personas. Los espacios bien iluminados naturalmente mejoran el estado de ánimo, reducen el estrés y ayudan a la conexión con el entorno.

Por otro lado, las celosías tienen un papel crucial en el **ámbito bioclimático.** Actúan como control solar que permite la iluminación indirecta y ventilación, evitando el exceso de radiación solar. Este efecto se veía acentuado, como se explica en [6], en el caso de las mashrabiyyas, que se combinaban con vasijas de agua en los balcones. El aire que entraba a través de la celosía se enfriaba por evaporación y templaba el espacio interior. El resultado es un método pasivo de enfriamiento muy eficaz para los climas cálidos y secos.

Desde el punto de vista social, la celosía es central en la **organización del espacio**. Según las normas culturales y religiosas del mundo islámico, los espacios privados deben ser íntimos y reservados, separándolos de los espacios públicos. Las celosías permiten una separación parcial, donde se cumplan estos principios sin renunciar al espacio exterior y sus beneficios. Lo mismo ocurre con la separación entre hombres y mujeres en los propios espacios públicos como las mezquitas.

Por último, en el plano simbólico las celosías son la representación tangible del **espíritu** islámico. En esta religión tienen mucha importancia los valores de equidad y unidad, la arquitectura debe trasmitir esto a través de las cualidades espaciales. Las celosías permiten el paso de la luz tamizada, unificada. Es algo que se expresa en [6] como una metáfora de la presencia divina tratando por igual a todo.

Asimismo, la celosía se engloba dentro de la **decoración** islámica, que es simbólica ya de por sí. La arquitectura islámica no se diferencia por sus espacios, ni los usos, es genérica, casi anodina al compararla con otras arquitecturas. Como resume Hillenbrand en [7] lo que la hace única es su decoración. Cuando vemos una obra islámica es completamente inconfundible gracias a su decoración que ocupa todo, que parece infinita, unificando cada elemento estructural y difuminando sus límites. Ese es el gran aporte de esta arquitectura frente a otras, la integración de la decoración en su estructura y espacios haciéndolos uno. Citando a Grabar en [2] página 223, “*la ornamentación* (en la arquitectura islámica) *es al mismo tiempo el esclavo y el amo del espacio en que aparece*”.

Fig. 5: Centro de Creación de Arte Contemporáneo de Andalucía, Córdoba

Conexión con la actualidad

Las celosías islámicas, aunque originarias de la Edad Media, mantienen una gran conexión con la arquitectura actual por las características ya mencionadas antes como su función bioclimática o simbólica.

Actualmente, son varios los arquitectos que han recuperado su uso, reinventándolo con las nuevas técnicas y materiales que permiten potenciar sus funciones tanto técnicas como estéticas. Así, cada vez se incluyen más en envolventes sostenibles como fachadas ventiladas o *brise-soleil*, donde el control solar es crucial. Obras como el Centro de Creación Contemporánea de Andalucía de Nieto y Sobejano (fig. 5), que mezcla las funciones técnicas y visuales de las celosías con la teoría fractal; edificios institucionales del estudio NUDES como la Mashrabiya Mosque (fig. 6) o Ismaili Jamatkhana Community Centre (fig. 7), que recuperan la función tradicional de estos elementos y los combina con un diseño paramétrico; o las Al Bahar Towers de AEDAS (fig. 8) que implementan estos elementos en una fachada móvil que mejora la eficiencia energética.

Las herramientas de diseño paramétrico y modelado 3D también tienen un papel central en el resurgimiento de las celosías. Permiten proyectar formas mucho más complejas, incluso combinaciones y superposiciones de estas de una manera rápida y relativamente sencilla, dejando atrás un uso reducido a pequeños huecos o pantallas y extrapolándolo a grandes superficies mucho más ambiciosas.

Precisamente esto es lo que ocurre en parte de la obra de Jean Nouvel, que se va a estudiar en este trabajo, centrándose en la adaptación de las celosías a distintos tipos de superficies no planas.

En la arquitectura islámica tradicional existen pocos ejemplos de adaptación a superficies distintas de planos, seguramente debido a su complejidad con las herramientas de las que se disponía en aquel momento. Vemos algunas cúpulas nervadas en la época *sel^yucida* como en la *madrasa* Büyük Karatay de Konya (fig. 9) o, de manera más cercana, en la mezquita de Córdoba (fig. 10). Incluso algunos ejemplos de superficies desarrollables como en los cilindros de los minaretes de la Gran mezquita de Damgan en Irán (fig. 11). Sin embargo, este trabajo pretende ir más allá y adentrarse en superficies no desarrollables o incluso de forma libre para analizar las dificultades que plantean.

Fig. 6: Mashrabiya Mosque

Fig. 7: Ismaili Jamatkhana Community Centre

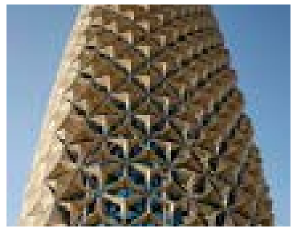


Fig. 8: Al Bahar Towers

Fig. 9: Büyük Karatay

Fig. 10: Mezquita de Córdoba

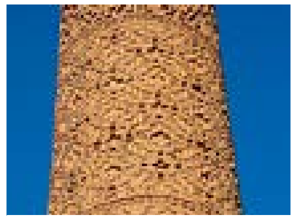


Fig. 11: Minaretes Gran Mezquita

1.2 Teselaciones

Las celosías islámicas se basan en los principios de la teselación, es decir, la subdivisión del plano en piezas llamadas teselas, iguales o no, de manera que se cubra el plano entero. Para conformar los planos calados se quedan únicamente con las aristas de esas teselas y se juega con el ancho de estas para dejar pasar más o menos luz.

Clasificación

Gracias a la información hallada en [9], [10] y [11] se ha podido elaborar el siguiente esquema a modo de resumen.

Fig. 12: Esquema completo

Las teselaciones del plano se pueden dividir en dos grandes grupos: periódicas y aperiódicas. Las primeras son aquellas que están formadas por secciones finitas que se relacionan entre sí siempre de la misma forma mediante movimientos rígidos en el plano, que no deforman las figuras, las isometrías planas. Las segundas sin embargo no tienen por qué relacionarse siempre de la misma forma y el encaje es prácticamente manual.

Fig. 13: Esquema zoom 1

Las teselaciones periódicas se pueden dividir a su vez en otros 3 grupos según las teselas que los forman. Las regulares están formadas por un único polígono regular, las semirregulares por 2 o 3 polígonos regulares y las irregulares no están formadas por polígonos regulares, sino por todo tipo de formas.

En este último grupo se insertan los 17 tipos de Fedorov, un cristalógrafo ruso que investigó las teselaciones planas a finales del s. XIX, aunque las demostraciones rigurosas llegaron en 1924 por Pólya y Niggli. Ellos explican que toda teselación es consecuencia directa de la repetición de una unidad básica, consecuencia de las tres isometrías planas, transformaciones afines que mantienen las distancias entre puntos: traslación, rotación y reflexión. Demostraron que, en el plano, siempre se siguen las normas y leyes dadas por estos tres elementos y que, por ello, solo existen 17 maneras de teselarlo. Estos patrones definidos pasaron a ser los 17 grupos de simetría plana, también llamados grupos cristalográficos planos por la similitud que guardan teóricamente con las estructuras cristalinas tridimensionales.

Curiosamente, estos 17 grupos están incluidos en los alicatados y celosías de la Alhambra, siendo el único ejemplo anterior a la clasificación de Fedorov que los contiene, o que al menos los mantiene. Esto demuestra el gran desarrollo intelectual que tuvo lugar en Al-Ándalus y cómo los avances en astronomía, física y matemáticas se aplicaron a diversos ámbitos, incluida la arquitectura.

Fig. 14: Esquema zoom 2

Este trabajo se centrará en las teselaciones regulares ya que, como se ha comentado antes, se centrará en superficies curvas, lo que conlleva una dificultad añadida.

Este grupo de teselaciones están formadas por un único polígono regular y solamente existen 3 tipos: 6 triángulos (fig. 15), 4 cuadrados (fig. 16) y 3 hexágonos (fig. 17). Esto es así porque tiene como condición que todos los ángulos que coincidan en un punto tienen que sumar 360

grados para así poder llenar la totalidad del plano. (6*60º; 4*90º; 3*120º, respectivamente).

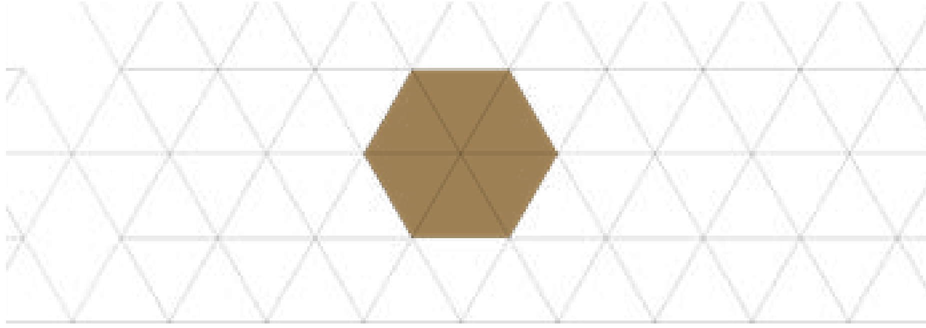


Fig. 15: Teselación de 6 triángulos

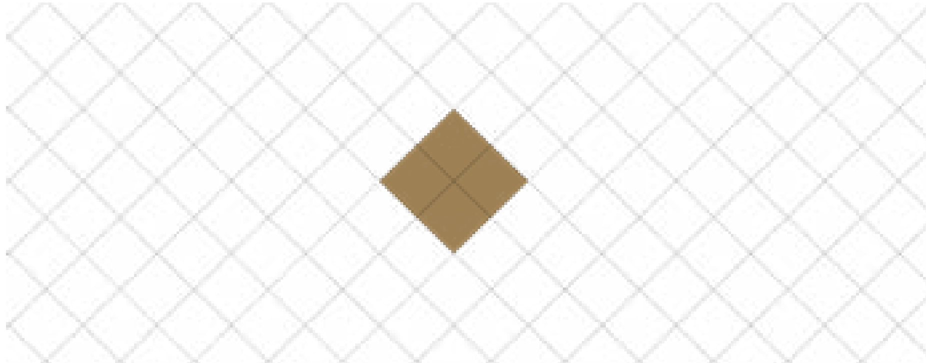


Fig. 16: Teselación de 4 cuadrados

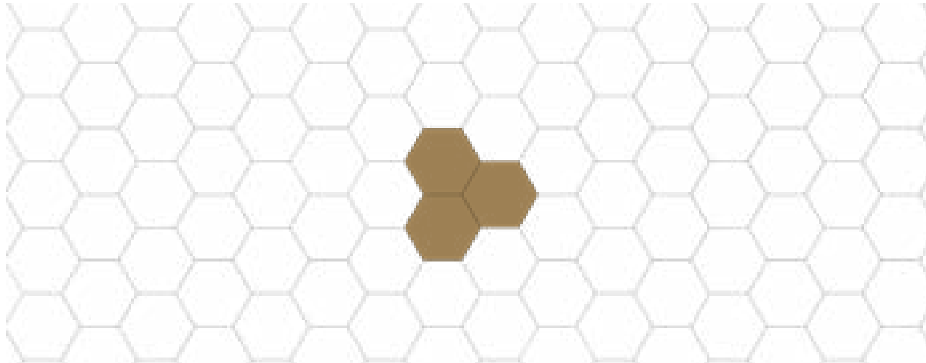


Fig. 17: Teselación de 3 hexágonos

Esto implica que la relación de unas celdas con otras sea la de rotación con respecto a uno de los vértices con los ángulos mencionados. Así, el plano se llena con una malla de puntos equidistantes, los vértices de los polígonos, alrededor de los cuales sucederán estas rotaciones, coincidiendo siempre los elementos de una rotación con la contigua. Es decir, un elemento pertenece a tantas rotaciones como vértices tenga.

Grasshopper tiene ya creados comandos para estos tres tipos de teselación, lo que facilita mucho el proceso de modelización, más adelante se explicarán en profundidad.

1.3 Modelización paramétrica

En el transcurso de este trabajo se ha utilizado la herramienta Grasshopper, un plugin de Rhinoceros en su versión Build 1.0.0008. Permite una programación visual donde los comandos se representan mediante "burbujas" conectadas con "cables", además se puede ver en tiempo real el resultado geométrico en el visor de Rhino.

Para la mejor comprensión del trabajo y su posible uso como manual, en este apartado se explicarán las burbujas clave utilizadas.

Formación de la teselación en plano

Fig. 18: Rectangular Array

Rectangular Array:

- Categoría: Transform > Array

- Función: organiza una geometría en una teselación rectangular según el tamaño de la celda que decide el usuario. Si se elige una celda cuadrada la teselación será regular.

- Parámetros de entrada: G (geometría), C (rectángulo de celda), X (número de elementos en dirección X) Y (número de elementos en dirección Y)

- Parámetros de salida: G (geometría), X (datos de la transformación)

Fig. 19: Scale

Scale:

- Categoría: Transform > Affine

- Función: escala una geometría en las 3 direcciones desde un punto según factor, ambos dados por el usuario.

- Parámetros de entrada: G (geometría), C (punto centro de la transformación), F (factor de transformación)

- Parámetros de salida: G (geometría), X (datos de la transformación)

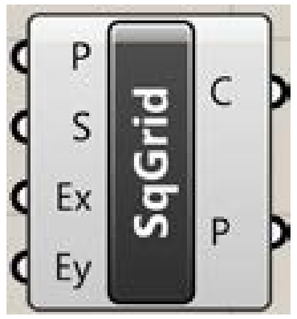


Fig. 20: Square

Square (SqGrid):

- Categoría: Vector > Grid

- Función: crea una teselación plana de celdas cuadradas

- Parámetros de entrada: P (plano base), S (tamaño de las celdas), Ex (número de celdas en la dirección x), Ey (número de celdas en la dirección y)

- Parámetros de salida: C (polígonos en árbol), P (vértices)

Hexagonal (HexGrid):

- Categoría: Vector > Grid
- Función: crea una teselación plana de celdas hexagonales
- Parámetros de entrada: P (plano base), S (tamaño de las celdas), Ex (número de celdas en la dirección x), Ey (número de celdas en la dirección y)
- Parámetros de salida: C (polígonos en árbol), P (vértices)

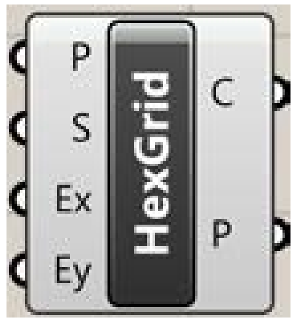


Fig. 21: Hexagonal

Triangular (TriGrid):

- Categoría: Vector > Grid
- Función: crea una teselación plana de celdas triangulares
- Parámetros de entrada: P (plano base), S (tamaño de las celdas), Ex (número de celdas en la dirección x), Ey (número de celdas en la dirección y)
- Parámetros de salida: C (polígonos en árbol), P (vértices)

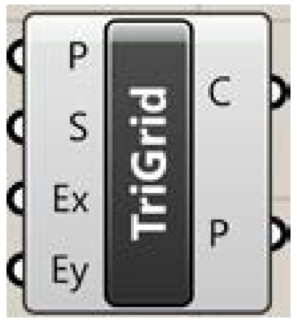


Fig. 22: Triangular

Adaptación a la superficie curva

Contour (ex):

- Categoría: Intersect > Mathematical
- Función: corta un brep (conjunto de superficies) o malla según unos planos paralelos a una distancia que da el usuario. El resultado son las curvas intersección.
- Parámetros de entrada: S (geometría), P (plano base), O (número de cortes), D (distancia entre cortes)
- Parámetros de salida: C (curvas resultado)

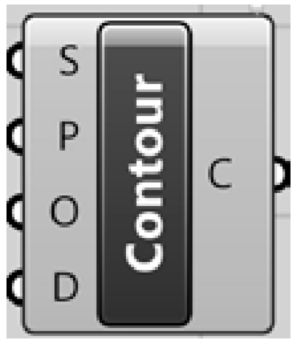


Fig. 23: Contour

Surface Split:

- Categoría: Intersect > Physical
- Función: corta y divide una superficie según un conjunto de curvas.
- Parámetros de entrada: S (superficie), C (curvas corte)
- Parámetros de salida: F (fragmentos de superficie)

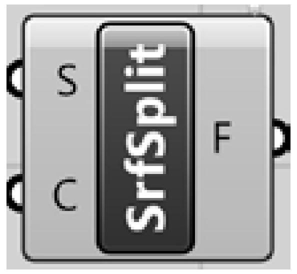


Fig. 24: Surface Split

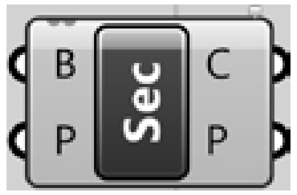


Fig. 25: Brep | Plane

Brep | Plane (sec):

- Categoría: Intersect > Mathematical
- Función: intersección entre un brep (conjunto de superficies) con un plano. El resultado son las curvas intersección
- Parámetros de entrada: B (brep), P (plano intersección)
- Parámetros de salida: C (curvas resultado), P (puntos de intersección en el caso que haya)

Fig. 26: Project

Project:

- Categoría: Curve > Util
- Función: proyecta curvas sobre un brep según un vector director.
- Parámetros de entrada: C (curvas), B (brep), D (vector director de proyección)
- Parámetros de salida: C (curvas proyectadas)

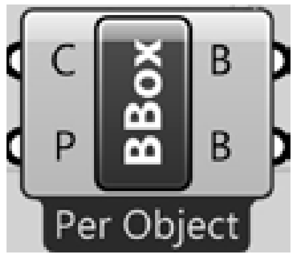


Fig. 27: Bounding Box

Bounding Box:

- Categoría: Surface > Primitive
- Función: incluye toda la geometría que se añada en una caja que la contenga
- Parámetros de entrada: G (geometría), P (plano de orientación de la caja)
- Parámetros de salida: B (caja en coordenadas de mundo), B (caja en coordenadas de plano)

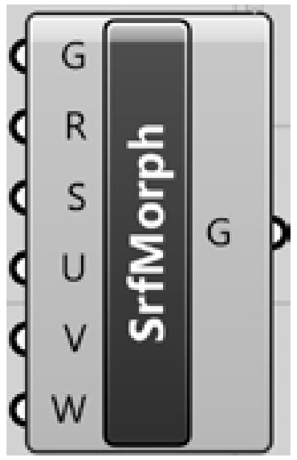


Fig. 28: Surface Morph

Surface Morph:

- Categoría: Transform > Morph
- Función: traslada y transforma una geometría contenida en una caja a una superficie según su dominio
- Parámetros de entrada: G (geometría), R (caja referencia), S (superficie objetivo), U (dominio de S en U), V (dominio de S en V), W (dominio de S en W)
- Parámetros de salida: G (geometría adaptada)

2. Modelado de obras de Jean Nouvel

[12]: El estudio de Jean Nouvel, fundado en París y actualmente conocido como Ateliers Jean Nouvel, ocupa una posición destacada en la arquitectura contemporánea internacional. Destaca por su falta de formalidad única y un profundo estudio del contexto de cada proyecto. Además, es muy reconocido por su capacidad de integrar arquitectura, tecnología y percepción sensorial.

Es por ello por lo que se le ha seleccionado su obra para este estudio de casos, ya que en los tres edificios se muestra un profundo conocimiento de la tradición islámica aunado a una innovación tecnológica propia del momento actual.

2.1 Instituto del Mundo Árabe

El Instituto del Mundo Árabe se ubica en París frente al Sena a la altura de la Isla de Sant-Louis. Se trata de una pastilla vertical colocada a los márgenes de la parcela, lo que crea una gran plaza pública con la emblemática fachada como fondo.

Fig. 29: Vista exterior desde la plaza

Se terminó su construcción en 1987 y fue pionero en la arquitectura adaptativa que actualmente está cobrando tanta fuerza. Para conseguir esto, Jean Nouvel proyectó una fachada formada por módulos que contenían diafragmas que se cerraban o abrían dependiendo de la luz exterior y condiciones climáticas interiores. Además, esto producía un juego de luces y sombras al interior, estableciendo una conexión cultural con las celosías islámicas típicas de esta arquitectura. En resumen, Nouvel adaptó los patrones y funciones de las celosías tradicionales a la arquitectura contemporánea y sus nuevos materiales y herramientas paramétricas.

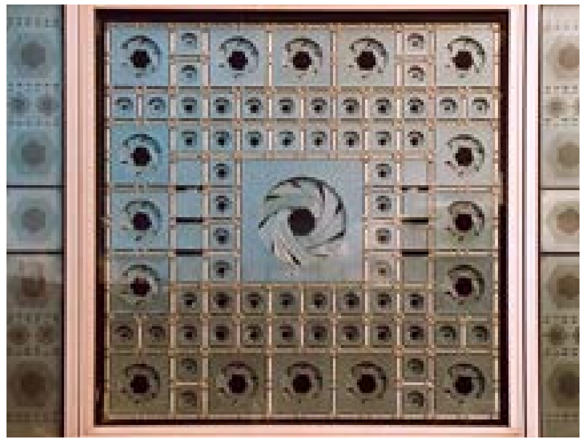


Fig. 30: Detalle de módulo de fachada

En cuanto al diseño de los paneles, cabe mencionar que son planos por lo que puede parecer que se aleja del tema de este trabajo. Sin embargo, Nouvel realiza aquí una operación muy importante que ayudará a comprender el proceso que sigue en las otras dos obras seleccionadas.

La composición de los módulos está inspirada en la Alfombra de Sierpinski, que se basa en la teoría fractal con cuadrados. El dato importante es que, una vez se consigue esta composición con cuadrados, se añade una pieza externa que le aporta complejidad, en este caso son los diafragmas.

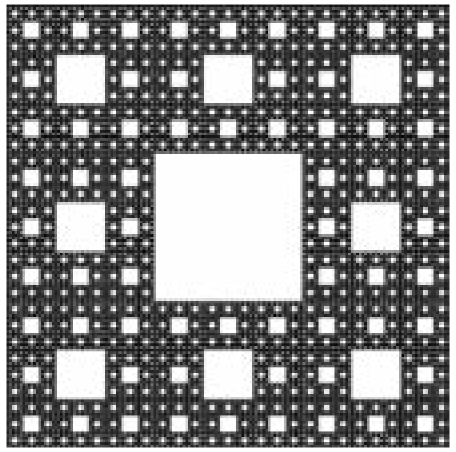


Fig. 31: Alfombra de Sierpinski

En conclusión, Nouvel parte de una estructura sencilla y controlada como la teselación cuadrada que adquiere complejidad aparentemente añadiendo otras piezas, pero sin variar la relación de unas con otras. Esta lógica proyectual se puede observar también en los siguientes ejemplos.

2.2 Doha Office Tower

La torre de oficinas en Doha se terminó de construir en el 2012 al norte de la bahía principal de esta ciudad.

Volumétricamente se plantea como un cilindro que, a partir de una altura de 118 metros, empieza a estrecharse, culminando en una aguja. El edificio está completamente cubierto de una malla compuesta por distintas capas que recuerdan a las celosías islámicas que se vienen analizando en el trabajo.

Fig. 32: Vista exterior

Teselación

La composición de esta malla consta de cuatro capas relacionadas de manera autosemejante. Comenzando con la primera de ellas, se puede apreciar que sigue la misma lógica ya explicada en la obra anterior: se crea una composición de teselación regular por cuadrados de tres por tres metros, a la que se añade una pieza en forma de estrella de 4 puntas para añadir riqueza y complejidad al diseño. Si prestamos atención la relación de unas estrellas con otras es igual a la de los cuadrados.

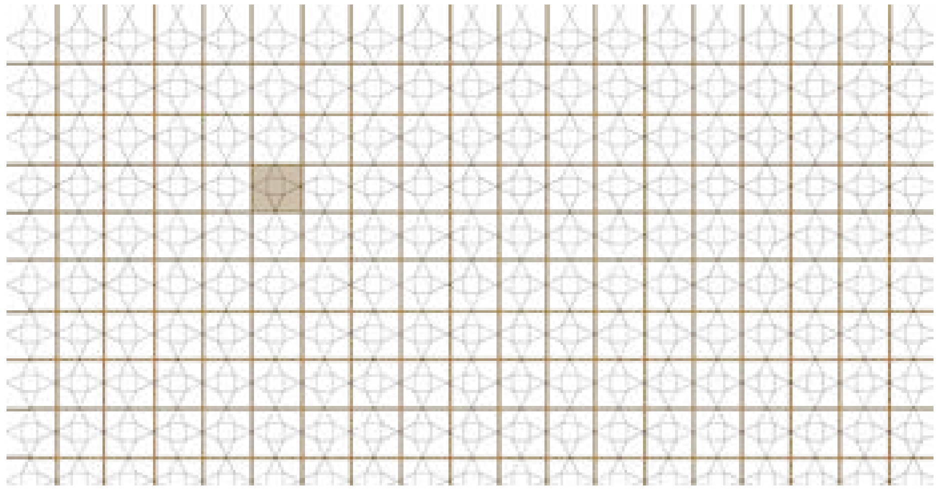


Fig. 33: Teselación de cuadrados con pieza añadida

Este mismo procedimiento se repite en la siguiente capa, cambiando únicamente la escala, que pasa a duplicar el tamaño de la pieza, de seis por seis metros. La manera en la que se relacionan resulta muy elemental, ya que, en una tesela de la segunda capa, al ser el doble de grande, caben cuatro teselas de la primera.

En la tercera y cuarta capa se repite esta misma metodología, duplicando el tamaño de la celda de la capa anterior, respectivamente.

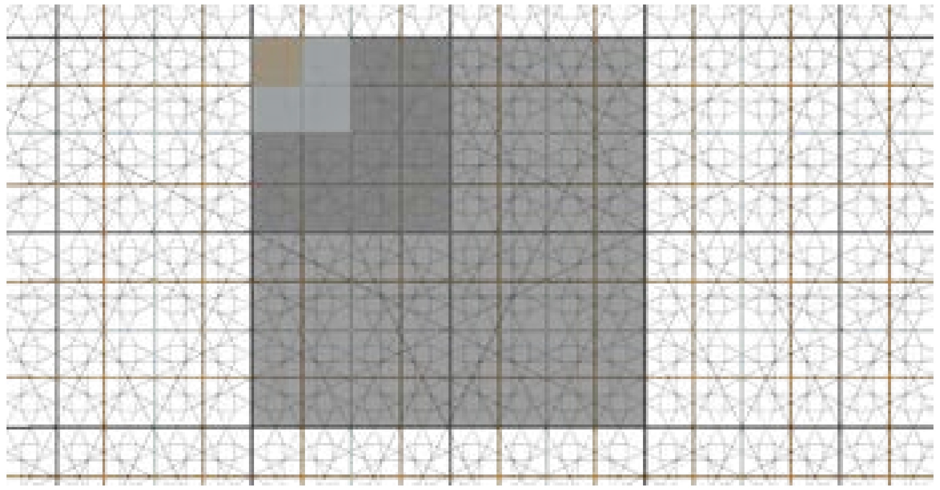


Fig. 34: Relación de las teselas de las 4 capas

Finalmente, superponiendo las cuatro capas se llega a la composición que se puede ver en el edificio que, aunque en un principio parece muy complejo, se ha demostrado que lo forman actuaciones geométricas básicas y fácilmente parametrizables.

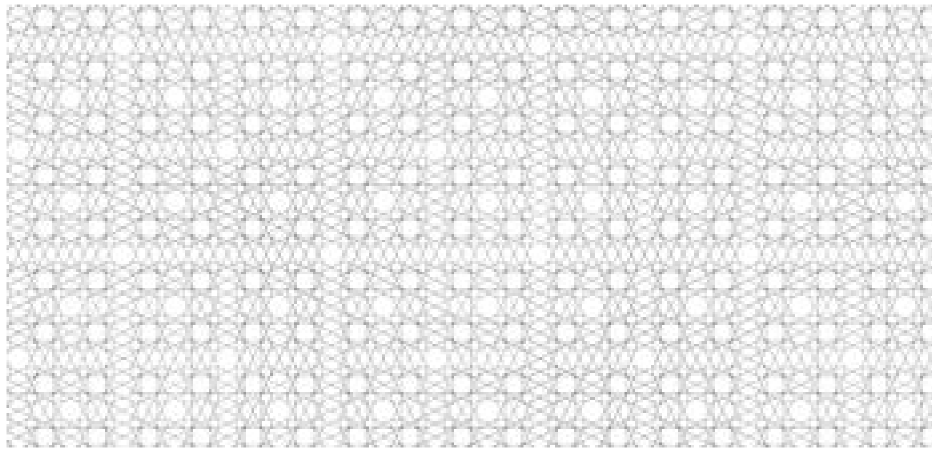


Fig. 35: Diseño final con las cuatro capas superpuestas

Adaptación a la superficie curva

En este ejemplo se va a tomar la parte inferior del edificio, aquella que es un cilindro regular, para analizar cómo se pueden adaptar estos patrones planos a superficies desarrollables.

Fig. 36: Guggenheim de Bilbao

Las superficies desarrollables son aquellas superficies regladas que se pueden desenvolver en un plano sin deformarse, existen tres tipos: cilíndricas, formadas por rectas paralelas, como el cilindro elíptico o de base circular; cónicas, formadas por rectas que se cortan en un punto, como el cono; y desarrollables tangenciales, formadas por rectas tangentes a la línea de estricción. Una superficie desarrollable en general está formada por fragmentos de estos tres tipos. Ejemplos de todas estas aparecen en el Guggenheim de Bilbao (fig. 36). Formalmente, las superficies desarrollables se caracterizan por tener curvatura gaussiana nula en todos sus puntos. La curvatura gaussiana es el producto de las curvaturas principales, existiendo siempre una dirección en la que la curvatura es cero, la dirección de una recta contenida en la superficie.

En el caso del cilindro es muy fácil la adaptación del patrón, ya que la cara lateral se puede desarrollar en un rectángulo de base el perímetro de la circunferencia (2*π*radio) y de altura igual a la del cilindro.

Esto producirá unas deformaciones homogéneas en todas las piezas y únicamente en una de las direcciones principales, aquella de curvatura positiva.

Modelado en Grasshopper

Se comienza el modelado diseñando la pieza que se quiere llevar a la teselación, en este caso la estrella de 4 puntas que se ha decidido construir por los vértices y unirlos en CAD.

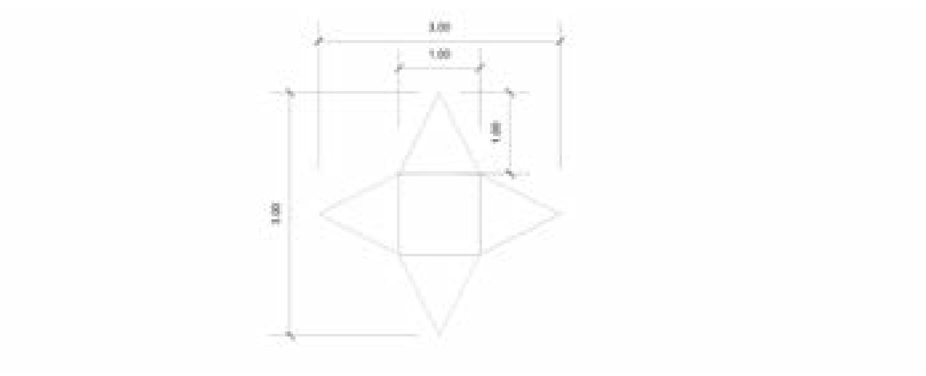


Fig. 37: Pieza estrella de cuatro puntas

Una vez conseguida esta pieza se tiene que crear la teselación. Al ser de cuadrados se puede usar el comando de `rectangular array` usando como celda la que envuelve a la pieza. El número en las direcciones x e y debe ser entero y, por lo tanto, el tamaño del cilindro deberá depender de esto.

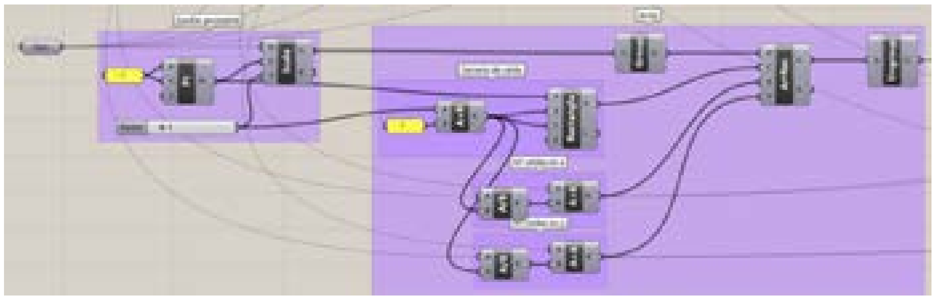


Fig. 38: Código para teselación de capa 1

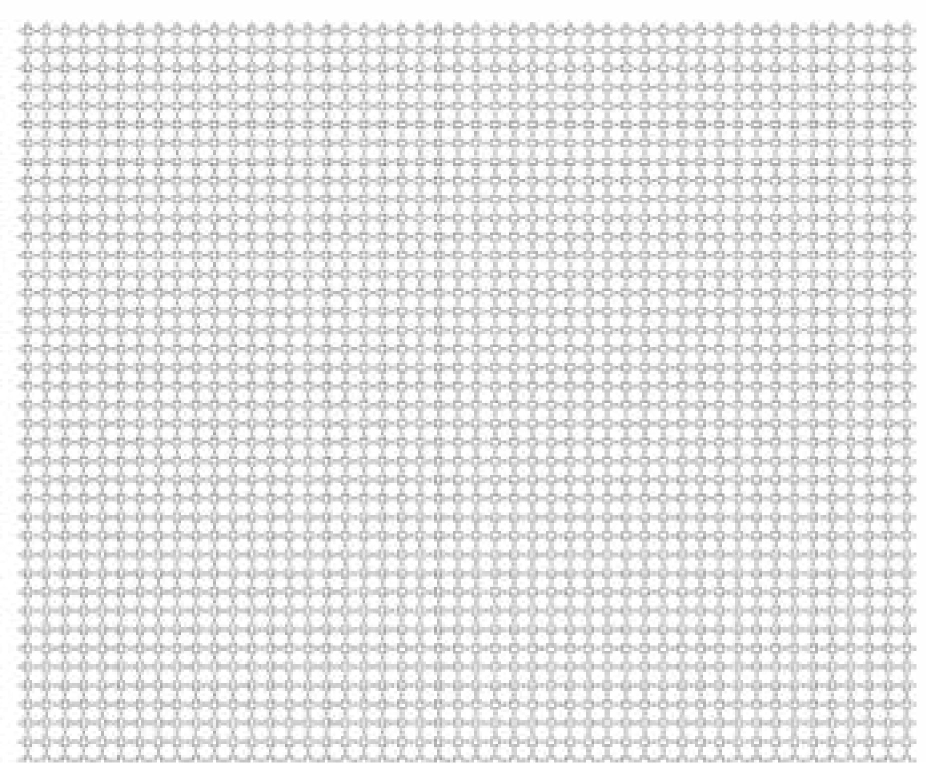


Fig. 39: Resultado de código para teselación de capa 1

Terminado el diseño de la primera capa, para obtener las tres restantes únicamente hay que escalar sucesivamente cada capa al doble. Esto depende del diseño que queramos obtener y es decisión del proyectista.

Finalmente, para transformarlo en el cilindro se usará el comando `Surface morph` que permite trasladar y transformar una geometría plana a otra superficie, en este caso el cilindro. Para ello se agrupará la geometría en una `bounding box`. Como las medidas de la malla que se ha diseñado en plano coinciden con la superficie desarrollable que es el cilindro, no habrá grandes modificaciones en las dimensiones de las piezas, únicamente aquellas derivadas de las distorsiones en la dirección de curvatura positiva.

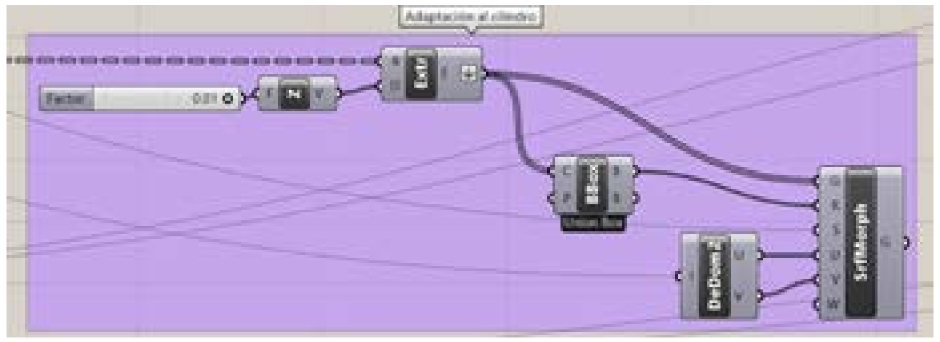


Fig. 40: Código para adaptar la teselación al cilindro

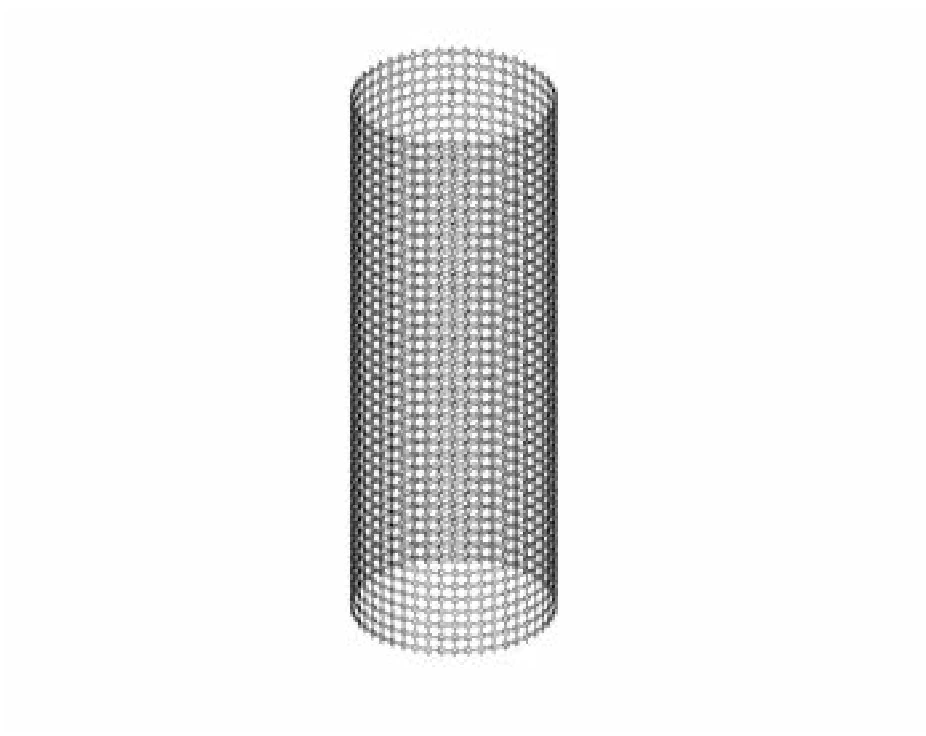


Fig. 41: Resultado de código para adaptar la teselación al cilindro

Este proceso se repite con cada una de las capas hasta llegar al resultado final.

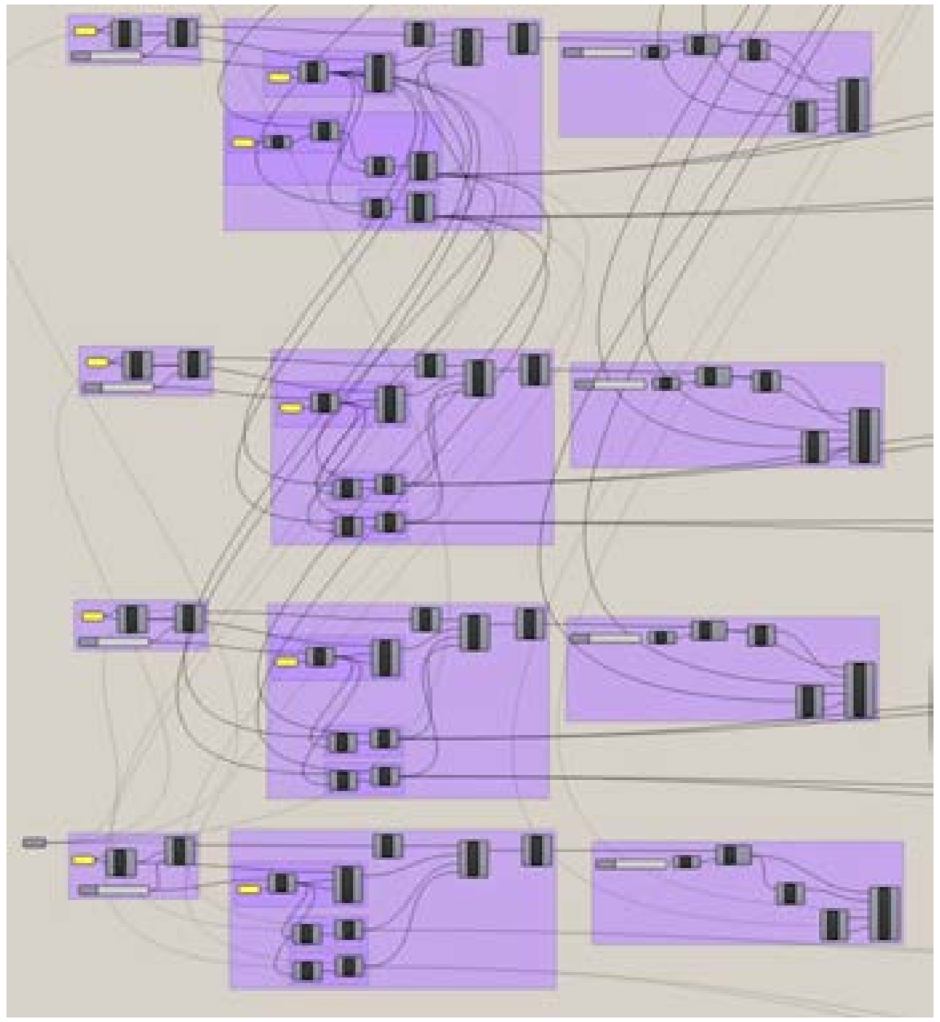


Fig. 42: Código final

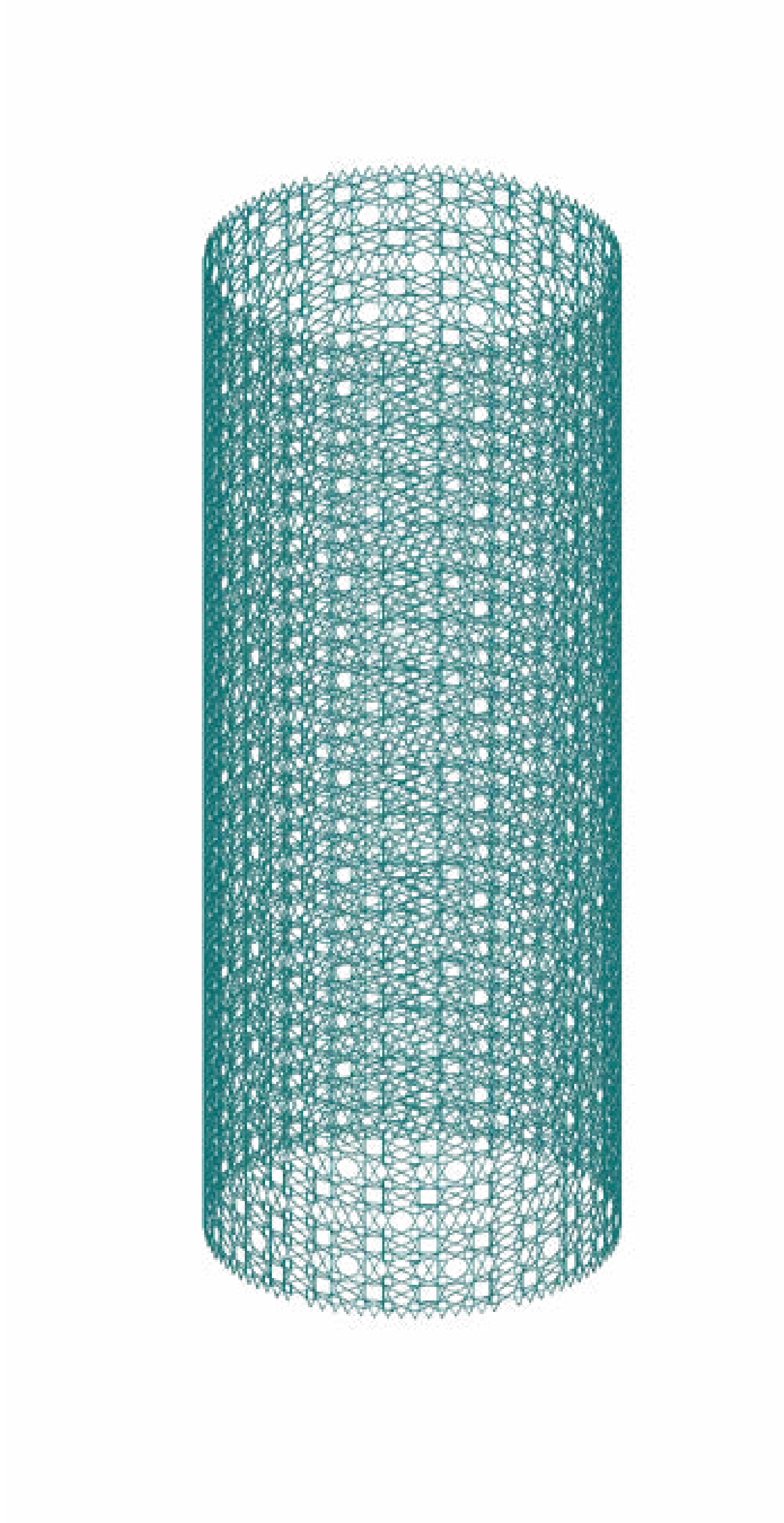


Fig. 43: Resultado de código final

2.3 Louvre Abu Dabi

El museo Louvre de Abu Dabi se sitúa sobre el Parque Nacional Marítimo de Saadiyat y Jean Nouvel lo plantea como una serie de cubos opacos cubiertos por una gran cúpula metálica perforada que simula estar bajo las copas de los árboles de un bosque.

Para lograr este efecto el estudio recurre a una gran celosía tridimensional cubierta por 4 capas por cada cara de una composición geométrica similar a las que hemos analizado en las obras anteriores.

Fig. 44: Vista exterior

Teselación

El diseño de las mallas es idéntico al analizado en la obra anterior en Doha (sección 2.2): cuatro capas de teselación de cuadrados con una estrella de cuatro puntas en cada uno y cada capa el doble de tamaño que la anterior. Como ya se ha explicado en profundidad anteriormente, pasaremos directamente a la adaptación a la superficie.

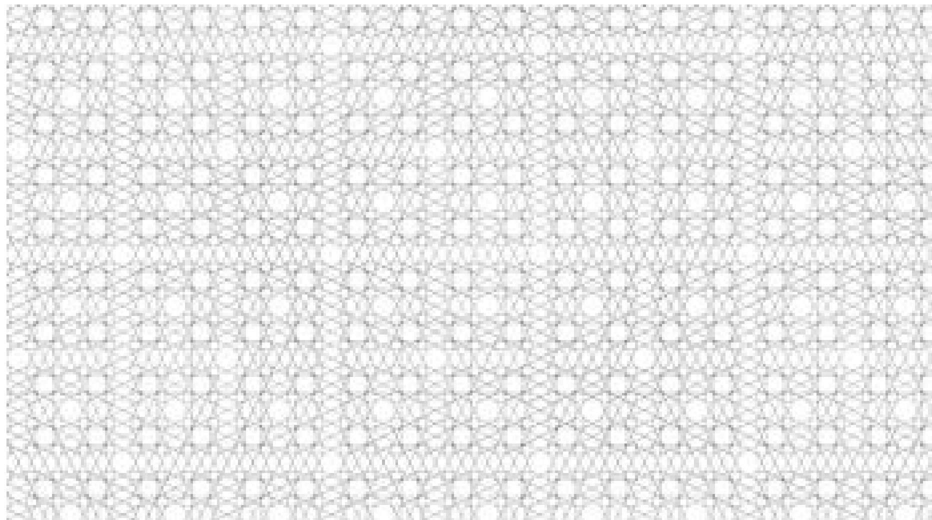


Fig. 45: Diseño final con las cuatro capas superpuestas

Adaptación a la superficie

La superficie utilizada en este edificio es un fragmento de esfera de 43 metros de altura con un diámetro de 176 metros. Este tipo de superficie tiene en todos sus puntos una curvatura gaussiana positiva, lo que la hace no desarrollable. Esta condición hace que el método anterior no sea el adecuado por la imposibilidad de crear una superficie plana con las mismas dimensiones. Es necesario encontrar otro procedimiento en el que las deformaciones sean las mínimas posibles.

El fragmento de la esfera está escogido de tal forma que sea posible proyectar el diseño plano directamente en vertical. Las deformaciones más notables suceden en los puntos para los que el vector normal a la superficie más se aleja del vector que usemos para proyectar, normalmente el vector unitario en la dirección del eje z. En este caso, esos puntos son aquellos en la circunferencia borde, pero al ser un fragmento muy cercano al polo se consideran deformaciones aceptables. Sin embargo, cabe mencionar que si el fragmento fuera mayor este método tampoco sería el adecuado al obtener deformaciones muy significativas cuanto más variaran los vectores normales.

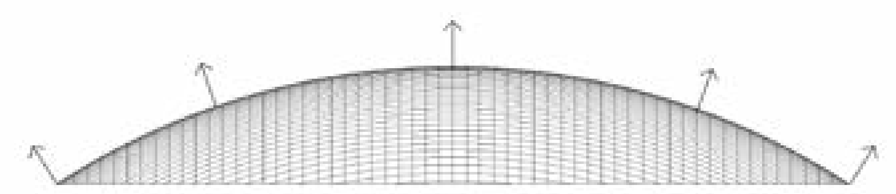


Fig. 46: Vectores normales al fragmento de esfera

Modelado en Grasshopper

Para crear la teselación en plano se usará el mismo código que en el ejemplo anterior (véase la sección 2.2 Modelado en Grasshopper): unir los vértices de la estrella, teselación cuadrada con array y escalado.

En cuanto a la esfera, es importante controlar las dimensiones y posición de esta, asegurándonos de colocarla alineada en la vista superior con la teselación plana que se quiere proyectar.

Únicamente queda proyectar el diseño según el vector que se elija, en este caso el unitario en la dirección Z.

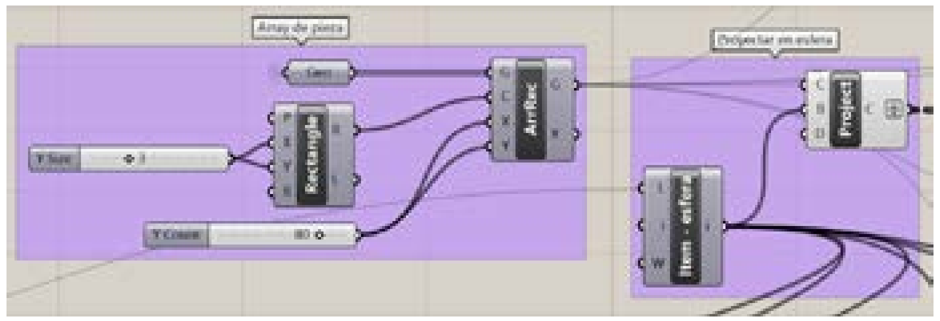


Fig. 47: Código para proyectar en la esfera la capa 1

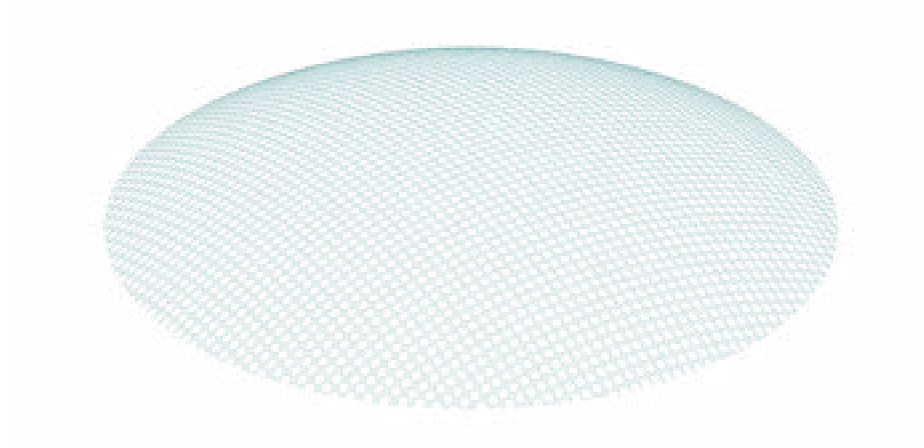


Fig. 48: Resultado del código para proyectar en la esfera la capa 1

Este paso se repetirá con cada una de las capas hasta que queden superpuestas en el fragmento de esfera.

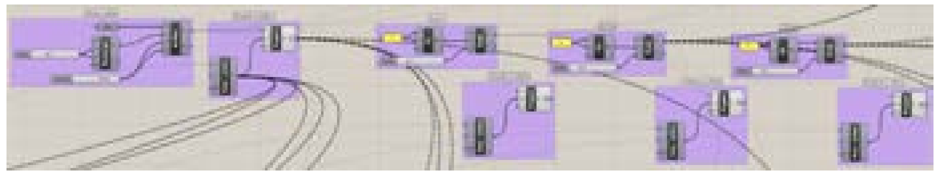


Fig. 49: Código final

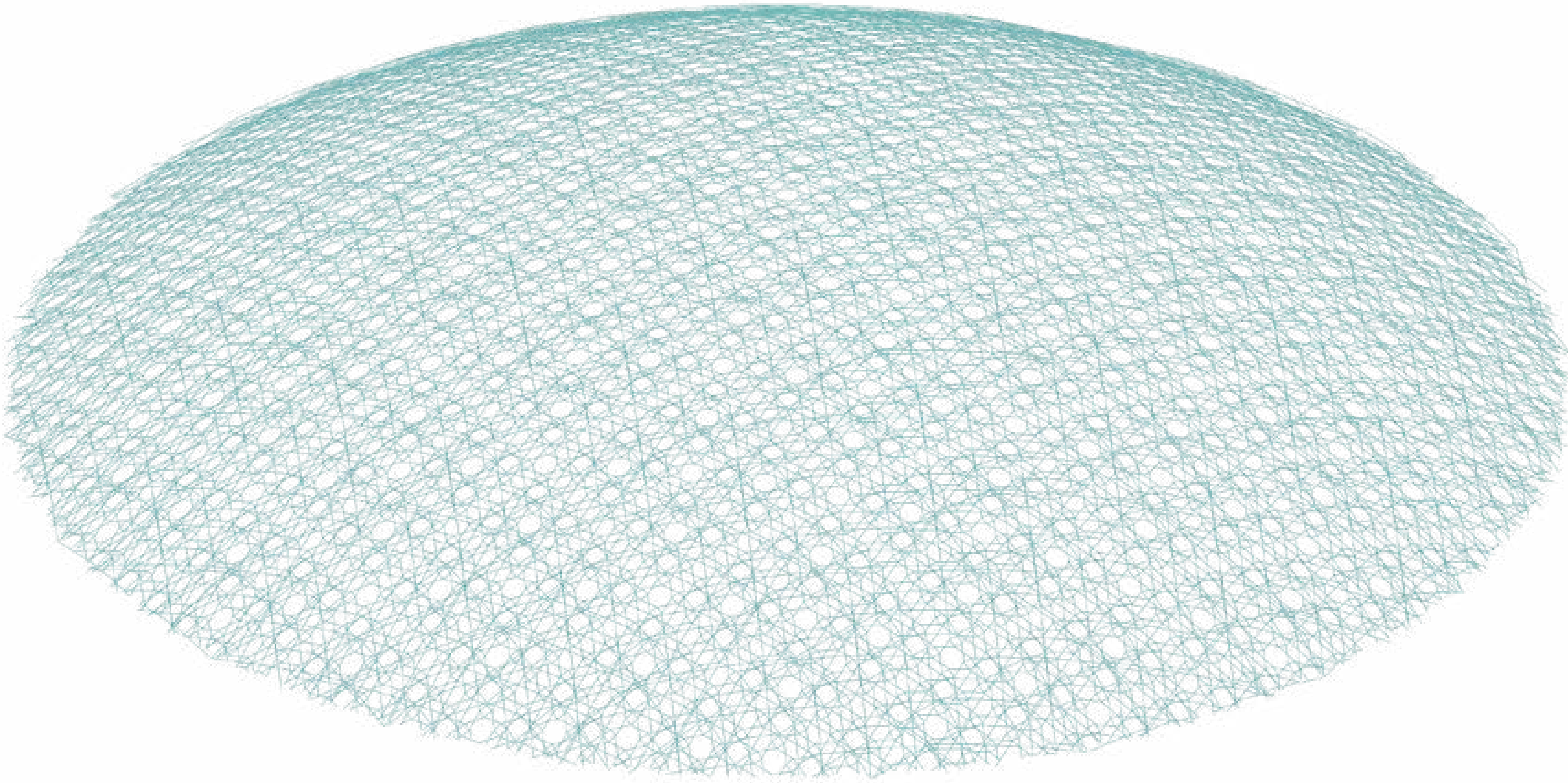


Fig. 50: Resultado de código final

3. Diseño Paramétrico

Tras el análisis de estas tres obras, donde se han identificado y modelado sus principales estrategias formales, este apartado tiene como objetivo plantear variaciones de la estrategia utilizada por Jean Nouvel y su estudio. Podemos así ver cómo el procedimiento se puede evolucionar para conseguir nuevos diseños sorprendentes y ampliar su campo de actuación

3.1 Variación del patrón

En esta sección se volverá a los conceptos teóricos de las teselaciones y su construcción en Grasshopper.

Como ya se ha mencionado antes, existen tres tipos de teselaciones regulares del plano: 4 cuadrados, 6 triángulos y 3 hexágonos. En los tres ejemplos analizados se usaba la primera de ellas, añadiendo complejidad con otra pieza que se relacionaba de la misma manera que unos cuadrados con otros.

Este mismo proceso se puede aplicar al resto de los tipos, obteniendo una gran variedad de soluciones y diseños. Cada teselación ofrece una relación entre piezas distinta, dependiendo de las propias relaciones entre polígonos que proporcionan las isometrías planas. Como ejemplo vamos a ver los tres tipos de teselaciones con una circunferencia inscrita.

Fig. 51: Teselación cuadrada con circunferencias inscritas

Fig. 52: Teselación triangular con circunferencias inscritas

Fig. 53: Teselación hexagonal con circunferencias inscritas

Como ya se ha dicho, este es solo un ejemplo de tantos posibles. Mediante este proceso se abre un gran abanico de posibilidades que han explorado otros arquitectos como es el caso de Shigeru Ban. En muchos de sus proyectos usa una teselación plana que deforma para adaptarse a las diferentes superficies. Se trata de una teselación regular de hexágonos a la que se le añade una estrella de seis puntas y ocurre lo mismo que en los casos anteriores: la relación de unas estrellas con otras es la de los hexágonos, aunque no estén representados en el diseño final.

Fig. 54: Teselación hexagonal con estrellas de seis puntas

Modelado en Grasshopper

En apartados anteriores ya se ha mencionado que Grasshopper cuenta con comandos predeterminados para crear teselaciones regulares. Todos ellos caen bajo la categoría de `Vector > Grid` (ver apartado 2.3) y lo beneficioso de usar estos comandos es que el resultado son los polígonos cerrados como una lista (si aplicamos "`flatten`"). Esto resulta muy útil ya que podemos hallar su centro fácilmente, crear una única pieza y moverla de su centro al centro de todos los polígonos.

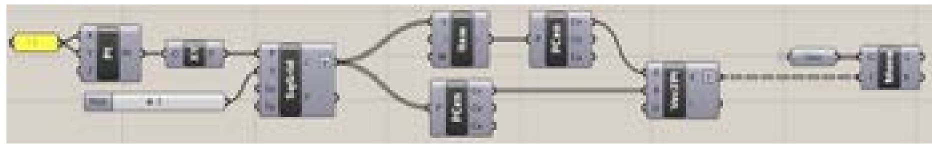


Fig. 55: Código de teselación cuadrada con geometría incorporada mediante vectores

3.2 Variación de la superficie

A lo largo del trabajo se ha visto la adaptación a superficies desarrollables y a no desarrollables. La primera gracias a un comando específico y la segunda mediante una proyección desde el plano. Sin embargo, hay superficies no desarrollables a las que no se puede aplicar este segundo método ya que los vectores normales a la superficie en muchos puntos varían demasiado del vector normal del plano desde el que se proyecta, produciendo unas deformaciones exageradas.

La solución que se plantea se basa en unir ambos métodos encontrando una superficie desarrollable o no desarrollable con bajas deformaciones lo suficientemente similar a la superficie final desde la que poder proyectar. Tomando como ejemplo el hiperboloide de una hoja, su superficie desarrollable más cercana es el cilindro.

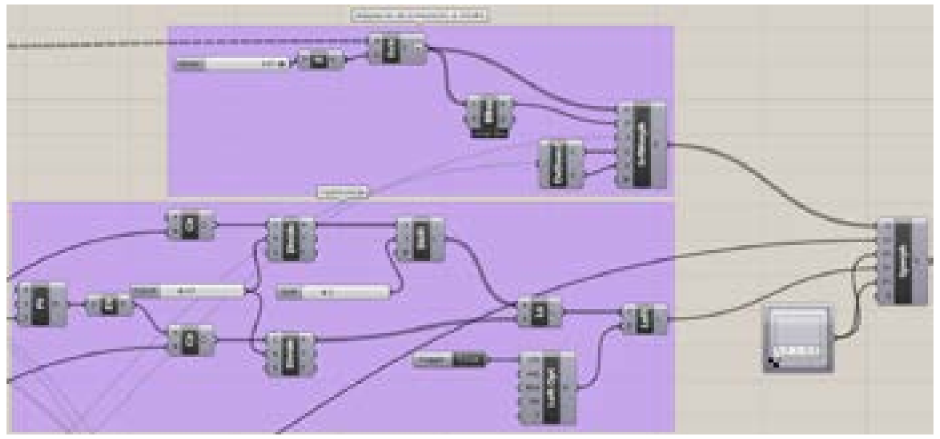


Fig. 56: Código para la adaptación de la teselación en un cilindro a un hiperboloide

Fig. 57: Resultado del código para la adaptación de la teselación en un cilindro a un hiperboloide

En muchos casos, no habrá una superficie ideal y habrá que utilizar varias haciendo un "puzle" teniendo cuidado en los bordes que unen unas con otras. Esta composicón deberá ir acompañada de un estudio de todo lo nombrado anteriormente: curvaturas, vectores normales, etc.

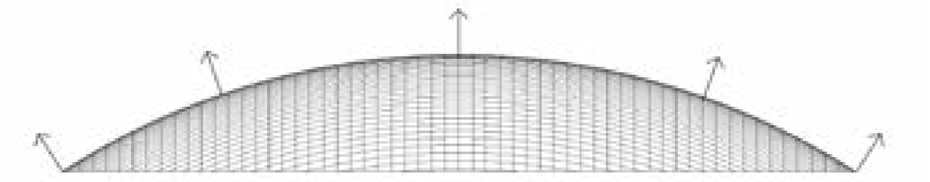


Fig. 58: Vectores normales al fragmento de esfera

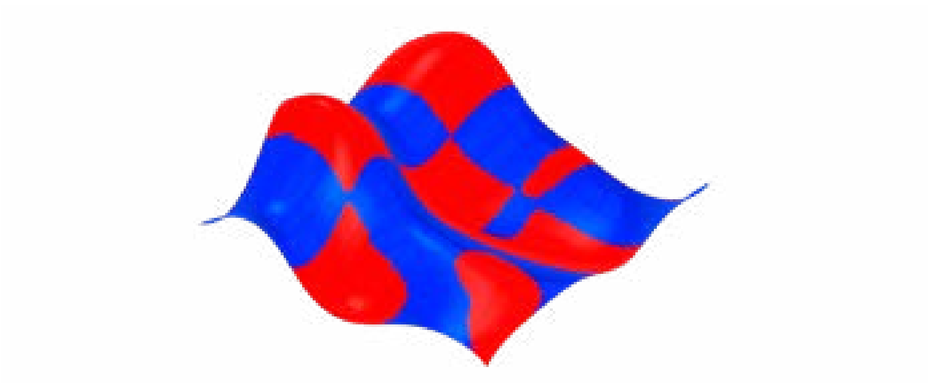


Fig. 59: Estudio de curvaturas en una superficie Coons. En rojo trozos de superficie con curvatura que es aproximadamente positiva, y en azul curvatura aproxidamente negativa

Por otro lado, aunque estemos hablando de superficies, el tipo de teselación que se elija influye en la calidad de la adaptación por la propia subdivisión que la superficie admita. Por ejemplo, la teselación de cuadrados se adaptará mejor a aquellas superficies en las que sea posible una división por dos sets de curvas perpendiculares (ej. en la esfera, paralelos y meridianos), mientras que en la triangular será óptima en aquellas con subdivisión geodésica. Esto hace que el diseño de la teselación plana siempre tenga que ir de la mano del diseño de la superficie si lo que estamos buscando es la mejor adaptación posible.

No en todos los casos de teselación en superficies no desarrollables buscan esta adaptación perfecta sin deformaciones, como en la obra de Shigeru Ban. Muchos de sus proyectos utilizan una teselación plana en planta que deforman completamente hasta el punto de crear pilares, aberturas, etc. Sin embargo, estos ejemplos se alejan de lo que se quiere estudiar en este trabajo y, por lo tanto, los procedimientos y comandos en Grasshopper son muy distintos, no se puede aplicar los descritos anteriormente.

Fig. 60: Centro Pompidou, Metz. Vista exterior

Fig. 61: Centro Pompidou, Metz. Detalle de la deformación en el pilar

Conclusiones

A lo largo de este trabajo se han explorado procedimientos de adaptación de las celosías islámicas a superficies curvas, analizando tanto obras existentes como aplicando dichos procedimientos a nuevas formas.

En primer lugar, la investigación inicial sobre la historia, evolución y simbolismo de las celosías ha permitido comprender la importancia de estos elementos y su riqueza patrimonial, además de sus grandes cualidades bioclimáticas. Lejos de ser meros recursos ornamentales, las celosías constituyen sistemas arquitectónicos complejos que responden a criterios funcionales, climáticos y espirituales profundamente ligados a la tradición islámica. Además, se ha puesto de manifiesto la necesidad de revisar su potencial y de plantear nuevas formas de adaptación al mundo contemporáneo.

Por otro lado, se ha querido introducir en el trabajo un marco teórico basado en las propiedades geométricas que rigen las teselaciones del plano que ha permitido comprender y enfocar mejor el análisis posterior. Este estudio, en particular de las teselaciones regulares, ha sido fundamental para poder abstraer las teselaciones de las imágenes de los proyectos y descomponerlas para su completa comprensión, indispensable para luego extraer las normas de su adaptación a las superficies curvas, donde las reglas del plano dejan de ser directamente aplicables.

Asimismo, el análisis detallado de las tres obras del estudio Jean Nouvel ha constituido el núcleo central del trabajo. A través de estos casos de estudio se ha demostrado que la reinterpretación de las celosías islámicas puede abordarse desde un enfoque riguroso en el que la complejidad formal no es arbitraria, sino consecuencia de decisiones geométricas precisas. Gracias a la identificación de los patrones originales en plano, su descomposición y adaptación a las distintas superficies curvas se ha podido establecer un método claro de actuación que abre las puertas a una gran variedad de soluciones. El hecho de incorporar piezas independientes a teselaciones regulares para añadir complejidad es una gran manera de trabajar con herramientas de diseño paramétrico y así poder adaptar al presente esta larga tradición. Se ha demostrado que con códigos relativamente cortos y sencillos se obtienen resultados muy llamativos gracias a estas nuevas ideas de reinterpretación de la celosía.

Por último, los apartados dedicados al diseño paramétrico han revelado tanto las dificultades como las oportunidades que surgen al trabajar con otros patrones o superficies no desarrollables. La aparición de deformaciones ha sido lo que ha reglado esta parte de la investigación, abordándolo como el principal problema a solucionar mediante una suma de los procesos anteriores. Estas indagaciones evidencian que el tema tratado es mucho más amplio de lo que se puede abarcar en este trabajo y que aquí únicamente se ha iniciado un camino posible hacia futuras investigaciones.

En conclusión, este Trabajo Fin de Grado propone la metodología para el estudio, adaptación y reinterpretación de las celosías islámicas en superficies desarrollables y no desarrollables, a la vez que reivindica su valor cultural, climático y geométrico. Igualmente, más que proponer soluciones cerradas, se plantea como un punto de partida para futuras líneas de investigación que profundicen en la relación entre tradición y modernidad, haciendo uso de las herramientas actuales de diseño paramétrico y las nuevas posibilidades que estas ofrecen, para hacer una arquitectura contemporánea más consciente de su legado y contexto.

Fuentes

Bibliografía y recursos digitales

[1] Real Academia Española- ÁSALE, “celosía”, Diccionario de la lengua española (DLE), Vigésima tercera edición. Disponible en: https://dle.rae.es/celosía (acceso: 10 de octubre de 2025)

[2] O. Grabar, La formación del arte islámico, 2nd ed. New Haven: Yale University Press, 1987

[3] S. Blair y J. Bloom, Arte y arquitectura del Islam, 1250-1800, 1st ed. New Haven: Yale University Press, 1994

[4] A. Sánchez Lucas, “La luz en la arquitectura islámica: Mezquita del Rey Abdul-Azul y Abu-Bakr”, Trabajo fin de grado, Dpto. de Estructuras y Física de la Edificación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2017. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/47412/1/TFG_SANCHEZ_LUCAS_ALEJANDRA.pdf

[5] L. Blanco Serreta, “Neuroarquitectura. Material, luz, sonido y emoción. Cómo crear un espacio para el alma”, Trabajo fin de máster, Dpto. de Construcciones Arquitectónicas, Universidad de Alicante, Alicante, España, 2024. [En línea]. Disponible en: https://rua.ua.es/entities/publication/e409d664-8845-4f7d-b206-eabb068805c7

[6] G. Michell, La arquitectura del mundo islámico: su historia y significado social, 1st ed. Madrid: Alianza Editorial, 1985

[7] R. Hillenbrand, Islamic Architecture: Form, Function, and Meaning, 1st ed. Nueva York: Columbia University Press, 1994

[8] "Celosías. Soluciones inéditas como cerramientos de Bahw". Patronato de la Alhambra y Generalife. https://www.alhambra-patronato.es/elemento-del-mes/celosias-soluciones-ineditas-como-cerramientos-de-bahw (acceso: 17 de octubre de 2025)

[9] F. de Paula Martínez. "La geometría matemática de los alicatados". Patronato de la Alhambra y Generalife. https://www.alhambra-patronato.es/geometria-matematica-alicatados (acceso: 19 de noviembre de 2025)

[10] "Teselas de la Alhambra. Teselaciones periódicas del plano". Cosmos y Matemáticas. https://matematicasycosmos.wordpress.com/2015/07/07/teselas-de-la-alhambra-teselaciones-periodicas-del-plano/ (acceso: 19 de noviembre de 2025)

[11] P. Fenoll Hach-Alí y A. López Galindo, Simetría en la Alhambra. Ciencia, belleza e intuición, 1st ed. Granada: Universidad de Granada, 2003

[12] Ateliers Jean Nouvel. https://www.jeannouvel.com/ (acceso: 14 de diciembre de 2025)

Procedencia de las ilustraciones