

MÁSTER UNIVERSITARIO EN
HERRAMIENTAS Y TECNOLOGÍAS
PARA EL DISEÑO DE ESPACIOS
ARQUITECTÓNICOS INTELIGENTES

Diseño de un auditorio para 130 personas en la localidad de Trokoniz utilizando técnicas de origami y herramientas de realidad aumentada

Trabajo fin de estudio presentado por:
Irene Bollain López

Tipo de trabajo: 5

Director/a: **Marcelo Fraile Narváez**

Fecha: **24/07/2023**

[VÍDEO >](#)

[MODELO 3D >](#)

RESUMEN

En general, la arquitectura se considera un estilo de arte estático e inmóvil y en pocas ocasiones se ha tratado de generar estructuras dinámicas y variables. Por esta razón, la arquitectura en ocasiones le es más complicado adaptarse a las necesidades de los usuarios a medida que evolucionan. Por otro lado, gracias a los avances tecnológicos, se puede ofrecer a los usuarios diferentes métodos de visualización mediante tecnologías como la realidad aumentada.

Este documento tiene como objetivo principal el diseño de un auditorio para 150 personas ubicado en el pueblo de Trokoniz, mediante el uso de técnicas de origami y herramientas de realidad aumentada. Este proyecto tiene como finalidad proporcionar nuevas técnicas y métodos para el diseño de arquitecturas dinámicas y adaptativas. Para la realización de este proyecto, se ha desarrollado un proceso evolutivo que incluye varios borradores-alternativas. Posteriormente, y de acuerdo con los objetivos definidos, se ha elaborado un anteproyecto que reuniera las características principales. Con este fin, se muestra el desarrollo del modelo 3D con Rhinoceros y la aplicación a realidad aumentada mediante Fologram, con la intención de visualizar e interactuar con el modelo y observar los beneficios de la arquitectura dinámica

Palabras clave:

Origami en arquitectura

Arquitectura dinámica

Arquitectura

Realidad aumentada en arquitectura

Arquitectura paramétrica

ABSTRACT

Architecture is generally considered a static and immobile art style and has rarely tried to generate dynamic and variable structures. For this reason, it is sometimes more difficult for architecture to adapt to the needs of users as they evolve. On the other hand, thanks to technological advances, users can be offered different methods of visualisation through technologies such as augmented reality.

The main objective of this paper is to design an auditorium for 150 people located in the village of Trokoniz, using origami techniques and augmented reality tools. This project aims to provide new techniques and methods for the design of dynamic and adaptive architectures. For the realisation of this project, an evolutionary process has been developed that includes several draft-alternatives. Subsequently, and in accordance with the defined objectives, a preliminary project has been elaborated to bring together the main characteristics. To this end, the development of the 3D model with Rhinoceros and the application to augmented reality using Fologram are shown, with the intention of visualising and interacting with the model and observing the benefits of dynamic architecture.

Keywords:

Origami in architecture

Dynamic architecture

Architecture

Augmented reality in architecture

Parametric architecture

Índice de contenidos

1.	INTRODUCCIÓN	10
2.	CONTEXTO Y ESTADO DEL ARTE	13
2.1.	Conceptos generales sobre el diseño de un auditorio	13
2.1.1.	Generalidades.....	13
2.1.2.	Estudio de ejemplos de referencia	14
2.1.3.	Partes y elementos principales	18
2.2.	Estudio Morfológico: el origami como inspiración de la forma	20
2.2.1.	¿Qué es el origami?.....	20
2.2.2.	Miura	21
2.2.3.	Yoshimura.....	22
2.2.4.	Bullet proof origami	24
2.2.5.	Origami fórceps.....	25
2.2.6.	Pentagonal high tower spring.....	26
2.2.7.	Starshade NASA.....	27
2.3.	Estudio de acerca de la visualización del proyecto: el uso de la realidad aumentada en arquitectura	28
2.3.1.	¿Qué es la realidad aumentada (RA)?	28
2.3.2.	Algunos programas de RA utilizados en el diseño.....	28
2.3.3.	Ejemplos de realidad aumentada.....	29
2.4.	Análisis de proyectos de referencia	30
2.4.1.	Análisis de estructuras diseñadas mediante origami.....	30
2.4.2.	Los espacios arquitectónicos virtuales	33
3.	OBJETIVOS Y METODOLOGÍA	37
3.1.	Objetivo general	38
3.2.	Objetivos específicos	38
4.	DESARROLLO ESPECIFICO DE LA CONTRIBUCIÓN	40
4.1.	Desarrollo de programa de necesidades	40
4.2.	Brief	42
4.3.	Elaboración de alternativas	43
4.3.1.	Primer borrador	43
4.3.2.	Segundo borrador.....	47
4.3.3.	Tercer borrador.....	51
4.4.	Selección de la propuesta final	54
4.4.1.	Modelo 3D.....	54
4.4.2.	Aplicación a la realidad aumentada	62

4.5.	Desarrollo de estructura	67
4.5.1.	Partes principales del auditorio.....	68
4.5.2.	Estructuras de origami aplicadas al auditorio.....	73
4.5.3.	Iluminación	75
4.5.4.	Sonido	75
4.5.5.	Materiales	78
5.	CONCLUSIONES	80
6.	LÍNEAS FUTURAS	82
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

Índice de figuras

Ilustración 1:	Auditorio de Tenerife (Astelus, 2017).....	14
Ilustración 2:	Anfiteatro en Letonia (Yasemin, 2022).....	15
Ilustración 3:	Cúpula de Gran teatro nacional de Beijing. (Andreu, 2014)	16
Ilustración 4:	Opera house, Sydney. (UTZON, 2015).....	17
Ilustración 5:	Snøhetta’s Shanghai Grand Opera House. (A. Muñoz, 2019)	17
Ilustración 6:	Distribución de zonas del Auditorio. Elaboración propia	18
Ilustración 7:	Estructura diseñada por Airearq	21
Ilustración 8:	Patrón Miura en arquitectura. Photo by form PxHere	21
Ilustración 9:	Miura en papel Tachi, T. (2009). Rigid-Foldable Generalized Miura-ori	22
Ilustración 10:	Plegado de Miura-Ori. Elaboración propia.....	22
Ilustración 11:	Gallery of Abu Dhabi Investment Council New Headquarters—Al Bahr Towers .	22
Ilustración 12:	Plegado curvo de Yoshimura	23
Ilustración 13:	Proceso de plegado de Yoshimura. Elaboración propia	23
Ilustración 14:	Esquema de plegado de Bullet-proof origami. (BYU, 2017)	24
Ilustración 15:	Bullet-proof origami. (BYU, 2017)	24
Ilustración 16:	Esquema de plegado de Oriceps (Oriceps, 2013)	25
Ilustración 17:	Origami fórceps (Oriceps, 2013).....	25
Ilustración 18:	Esquema de plegado de Pentagonal High tower Spring	26
Ilustración 19:	Starshade. (NASA, 2022).....	27
Ilustración 20:	Esquema de Starshade. (NASA, 2022)	27
Ilustración 21:	Pokémon GO. (Ipanema, 2017).....	29
Ilustración 22:	Carlo Ratti: Edificio histórico Italiano. (M. Muñoz, 2022)	30
Ilustración 23:	Al Bahar Towers. (Dazne, 2018)	31
Ilustración 24:	Recinto ferial de Cuenca. (Moneo Brock Studio, Arquitectos, 2012).....	31
Ilustración 25:	Capilla temporal para las diaconisas de St Loup. (LOCALARCHITECTURE, 2018)	32
Ilustración 26:	Estación de oriente de Lisboa. (Wikiarquitectura, 2014).....	33
Ilustración 27:	Maquetas digitales de realidad aumentada para el proceso de diseño arquitectónico. (Ruiz, Rocío et al., 2014).....	34
Ilustración 28:	Tablets con realidad aumentada (Beziers, 2021).....	34
Ilustración 29:	Pabellón de Greg Lynn. (Dezeen, 2016).....	35
Ilustración 30:	Metodología SMART. Elaboración propia	37
Ilustración 31:	Boceto 1 borrador. Elaboración propia.....	43
Ilustración 32:	Modelo de Grasshopper del 1 borrador. Elaboración propia.....	43

Ilustración 33: Maqueta a pequeña escala del 1 borrador. Elaboración propia	44
Ilustración 34: Cúpula. Paso 1. Elaboración propia	45
Ilustración 35: Cúpula. Paso 2. Elaboración propia	45
Ilustración 36: Cúpula. Paso 3. Elaboración propia	46
Ilustración 37: Cúpula. Paso 4. Elaboración propia	46
Ilustración 38: Modelo del 2 borrador y modelo. Elaboración propia	47
Ilustración 39: Borrador 2. Elaboración propia	48
Ilustración 40: Toldo. Paso 1. Elaboración propia	48
Ilustración 41: Toldo. Paso 2. Elaboración propia	49
Ilustración 42: Toldo. Paso 3. Elaboración propia	49
Ilustración 43: Toldo. Paso 4. Elaboración propia	50
Ilustración 44: Modelo del 3 borrador y modelo. Elaboración propia	51
Ilustración 45: Estrella. Elaboración propia	52
Ilustración 46: Creación de matriz de estrellas: Paso 1. Elaboración propia	52
Ilustración 47: Creación de matriz de estrellas: Paso 2. Elaboración propia	53
Ilustración 48: Creación de forma base y escenario. Elaboración propia	54
Ilustración 49: Proceso de creación de gradas y escaleras. Elaboración propia	54
Ilustración 50: Auditorio completo. Elaboración propia	55
Ilustración 51: Zona de entrada. Elaboración propia	55
Ilustración 52: Auditorio completo. Elaboración propia	56
Ilustración 53: Cúpula en Grasshopper. Elaboración propia	56
Ilustración 54: Cúpula. Paso 1. Elaboración propia	57
Ilustración 55: Cúpula. Paso 2. Elaboración	57
Ilustración 56: Cúpula. Paso 3. Elaboración propia	58
Ilustración 57: Cúpula. Paso 4. Elaboración propia	58
Ilustración 58: Cúpula. Paso 5. Elaboración propia	59
Ilustración 59: Cúpula. Paso 6. Elaboración propia	59
Ilustración 60: Creación de matriz de estrellas: Paso 1. Elaboración propia	60
Ilustración 61: Creación de matriz de estrellas: Paso 2. Elaboración propia	60
Ilustración 62: Creación de matriz de estrellas: Paso 3. Elaboración propia	61
Ilustración 63: Anfiteatro en RA. Elaboración propia	62
Ilustración 64: Comando Fologram. Fologram	64
Ilustración 65: Mallado. Fologram	64
Ilustración 66: Sincronización con Grasshopper. Elaboración propia	65
Ilustración 67: Apertura o cierre de cúpula. Elaboración propia	65

Ilustración 68: Apertura o cierre de estrellas. Elaboración propia.....	66
Ilustración 69: Auditorio final. Elaboración propia.....	67
Ilustración 70: Auditorio visto desde el interior. Elaboración propia.....	67
Ilustración 71: Render del auditorio. Elaboración propia.....	68
Ilustración 72: Plano de escenario del auditorio. Elaboración propia.....	69
Ilustración 73: Renderizado de las gradas. Elaboración propia.....	69
Ilustración 74: Escaleras de las gradas. Elaboración propia.....	70
Ilustración 75: Dimensiones de asientos. Elaboración propia.....	70
Ilustración 76: Planos de las gradas. Elaboración propia.....	71
Ilustración 77: Entrada al auditorio. Elaboración propia.....	72
Ilustración 78: Auditorio desde fuera. Elaboración propia.....	73
Ilustración 79: Matriz de estrellas en el escenario. Elaboración propia.....	74
Ilustración 80: iluminación en el escenario. Elaboración propia.....	75
Ilustración 81: Reverberación con las estrellas del escenario. Elaboración propia.....	76
Ilustración 82: Reverberación con las estrellas del escenario. Elaboración propia.....	77



Diseño de un auditorio
para 130 personas
en la localidad de Trokoniz
utilizando técnicas de origami
y herramientas de realidad aumentada

1

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

En este apartado de introducción se realiza una presentación del contexto que se desarrolla durante este proyecto. Posteriormente, se describen los problemas y necesidades detectados en la condición de partida y se plantea el objetivo a alcanzar con el desarrollo del proyecto.

Cabe destacar que uno que los grandes inconvenientes de este proyecto es no haber contado con trabajos anteriores del propio máster o de arquitectura, de los cuales tener referencias previas.

En el documento que se presenta a continuación se realiza el proyecto de diseño de un auditorio para 130 personas ubicado en la localidad de Trokoniz utilizando herramientas de realidad aumentada y técnicas de origami.

Este auditorio está planteado para realizar diversas actividades multidisciplinares, es decir, desde conciertos, charlas o recitales hasta talleres o eventos y está ubicado en la localidad de Trokoniz, situado en el Álava, País Vasco. Al realizarse todo tipo de actividades en este auditorio, se dirige también a todo tipo de público, desde los pequeños hasta los más mayores.

Las características que hacen especial y único a este auditorio son el uso del **origami** como forma de la estructura y la **realidad aumentada** como método de visualización. Por una parte, el origami aporta movimiento a la estructura permitiendo generar un espacio adaptable a las necesidades y por la otra, la realidad aumentada posibilita la visualización del auditorio tanto en el emplazamiento concreto como en otro lugar.

Una vez se explica el contexto general del proyecto, se expone la problemática principal del trabajo.

Actualmente, muchos arquitectos afirman que la situación actual de las ciudades presenta una obsolescencia en cuanto al estilo de construcción estático, debido a que las nuevas necesidades los usuarios evolucionan rápidamente. En respuesta a estas necesidades, se considera que es la oportunidad perfecta para que la arquitectura evolucione un paso más y potencie un estilo de arquitectura dinámica y variable como solución al problema. (M. Lirios, 2022)

Para ello, se plantea el uso del origami como forma de la estructura para conseguir la dinamicidad que se busca en este proyecto. El uso del origami aporta adaptabilidad a las circunstancias o necesidades del usuario y aporta a la estructura la cualidad de ser un espacio arquitectónico inteligente

Además, en la última década se observa el aumento del uso de la tecnología y una evolución notable de la misma. Por esta razón, se plantea el uso de la realidad aumentada para la visualización del proyecto.

En este trabajo de fin de máster, se expone un caso práctico (anteproyecto) aplicado a un auditorio, utilizando esta misma metodología "origami" y exponiendo este auditorio en realidad aumentada.



Diseño de un auditorio

para 130 personas
en la localidad de Trokoniz
utilizando técnicas de origami
y herramientas de realidad aumentada

2

CONTEXTO Y ESTADO DEL ARTE

- 2.1. Conceptos generales sobre el diseño de un auditorio
- 2.2. Estudio Morfológico: el origami como inspiración de la forma
- 2.3. Estudio de acerca de la visualización del proyecto:
- 2.4. Analisis de proyectos de referencia

2. CONTEXTO Y ESTADO DEL ARTE

A continuación, se presenta el tema. En este caso, se presenta el diseño de un auditorio y varios ejemplos de este para una mayor comprensión.

2.1. CONCEPTOS GENERALES SOBRE EL DISEÑO DE UN AUDITORIO

2.1.1. Generalidades

La palabra *auditorio* proviene del latín *auditórium* y se usaba en la época romana para referirse a los anfiteatros, lugares en los que se realizaban eventos y en donde el público presenciaba el espectáculo sentado en butacas que rodeaban el escenario. Estos espacios nacieron en Grecia para la realización de eventos culturales u obras de teatro al aire libre. En esa época, todos los auditorios eran al aire libre y poco a poco fueron evolucionando hasta que se les incluyeron techos y paredes, tal y como los conocemos hoy en día. (Maishan & Alibaba, 2017)

Al inicio estos espacios consistían únicamente en gradas colocadas en una pendiente aprovechando una colina y el escenario con un muro detrás. Mediante esta configuración se conseguía mejorar la acústica, debido a que, por una parte, la pendiente permitía reducir los sonidos del entorno gracias a la protección de la colina y por otra parte, conseguir que el sonido llegue de manera directa al público. Además, la colocación del muro era de mucha utilidad debido a que el sonido rebotaba sobre ella y llega a los actores, consiguiendo que estos pudiesen escuchar mejor. (A. Sanz, 2019)

A continuación, se muestran los diferentes tipos de auditorio (Maishan & Alibaba, 2017):

- **Auditorio de teatro**

Este tipo de auditorios se utiliza para obras de teatro. Generalmente cuentan con una zona más elevada como escenario donde se colocan los actores y otra zona con una gran cantidad de asientos.

- **Auditorio de conciertos**

Estos auditorios se utilizan para la realización de conciertos u otros eventos musicales y suelen contar con una acústica excelente.

• Auditorio de conferencias

Los auditorios diseñados para la realización de conferencias son similares a los de teatro. También cuentan con una zona donde se coloca el orador y otra con una gran cantidad de asientos.

• Auditorio de cine

Los auditorios de cine se utilizan para proyectar películas. Estos auditorios cuentan con una gran pantalla en donde se proyecta la película y una zona de asientos para el público.

• Auditorio al aire libre

Por último, el auditorio al aire libre puede ser multidisciplinar o utilizarse para conciertos y festivales. También cuenta con una zona de escenario y otra para los asientos del público.

2.1.2. Estudio de ejemplos de referencia

A continuación, se presentan 5 ejemplos de auditorios.

1. Auditorio de Tenerife

El auditorio de Tenerife es un lugar estéticamente impactante que contiene más de 15 espacios. Se propone como lugar para realizar cualquier actividad o idea. Esta arquitectura fue diseñada por Santiago Calatrava en el año 2003. Esta obra se caracteriza por su inmensa cubierta de hormigón con forma de ola.



Ilustración 1: Auditorio de Tenerife (Astelus, 2017)

El auditorio cuenta con 1.800 plazas y una sala de música de Cámara para 400 personas. Además, con sala como vestuarios, almacenes, salas de descanso, y otra multitud de salas con diferentes características.

La mayoría de las salas están acondicionadas artificialmente, aunque el vestíbulo de las áreas de circulación se ventila de manera natural mediante una corriente de aire inducida introducida desde las estancias acristaladas.

Por último, hay que mencionar que para optimizar la acústica los paneles interiores adoptan formas cristalinas y, además, en vez de telón, se instaló una pantalla de Lamas de aluminio, que al elevarse funcionan como reflectores de sonido. (Arquitectura Viva, 2015)

2. Escenario al aire libre de Mežaparks

Este escenario es un centro de eventos y festivales nacionales. La renovación de este auditorio comenzó en el año 2007 y finalizó en el 2022. A la hora de renovarlo, se definió como objetivos: Mejorar la capacidad, la acústica y la seguridad.



Ilustración 2: Anfiteatro en Letonia (Yasemin, 2022)

Este anfiteatro tiene un diseño de elipse asimétrica que incluye una azotea, un área abierta central y un área para sentarse.

Este anfiteatro está rodeado por un bosque, lo cual es beneficioso para un mejor sonido. Además, cuenta con un techo como elemento acústico principal y paneles acústicos que se ajustan para dirigir el sonido.

Por esta razón, es interesante ya que los pequeños paneles acústicos son modificables para conseguir unas mejores capacidades sonoras y funcionan como un origami plegable y desplegable. (Yasemin, 2022)

3. Gran teatro nacional de Beijing

Este teatro está ubicado en Beijing y es un edificio contemporáneo con estética de cúpula que fue diseñado por Paul Andreu entre 2001 y 2007. Este edificio tiene 213 m de largo, 144 m de ancho y 46 m de alto. Contiene una piel en la superficie que por el día permite que entre la luz y por la noche convierte en una linterna hacia el exterior.



Ilustración 3: Cúpula de Gran teatro nacional de Beijing. (Andreu, 2014)

Este espacio consiste en un edificio de 149.500 m² que aloja 3 auditorios y otros espacios para arte o exposiciones. Se plantea como un distrito urbano con varias calles, tiendas, zonas de descanso y restaurantes. Todos los auditorios se encuentran conectados a esta zona común, situando las entradas de manera distribuida para el acceso de los usuarios. Además, en el piso más alto, bajo la cubierta, se puede encontrar una zona de descanso como mirador donde se puede disfrutar las vistas de la ciudad. (Andreu, 2014)

4. Opera house, Sydney

Esta edificación contiene en su interior varias zonas teatrales y hasta 1.000 salas en total con diferentes funciones. Su capacidad es de hasta 5.000 personas simultáneamente.

A la hora de construir esta edificación, el cliente decidió pasar de 2 teatros a 5, por lo que todo el diseño tuvo que ser modificado. Los 3 edificios principales son la sala de conciertos, el teatro de ópera y el restaurante.

La casa de la ópera de Sídney alberga en su interior hasta 5 teatros, 5 estudios de ensayo, dos salones principales, cuatro restaurantes, 6 bares y varias tiendas de recuerdo.



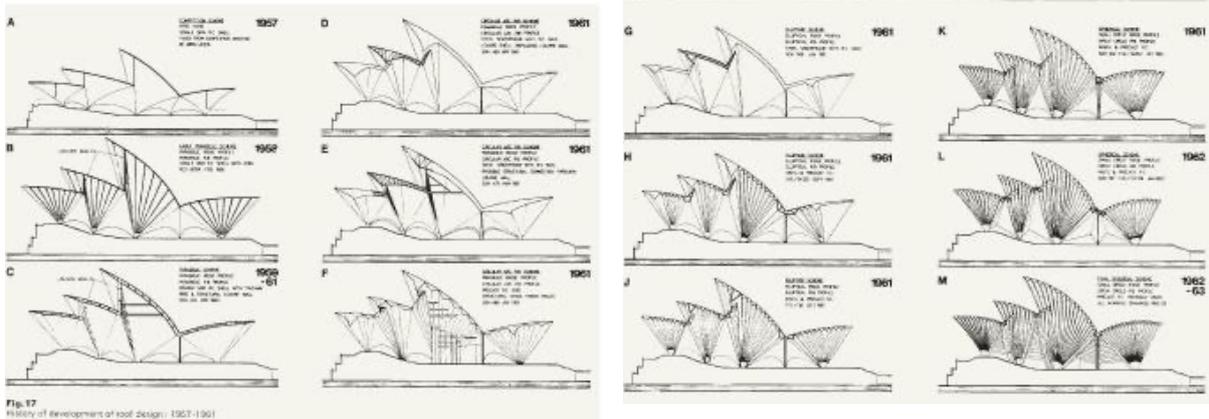


Ilustración 4: Opera house, Sydney. (UTZON, 2015)

Todos los elementos del diseño se pensaron y situaron con la intención de que los visitantes se sintieran relajados y bienvenidos. (UTZON, 2015)

5. Snøhetta's Shanghai Grand Opera House

Snøhetta, un estudio de arquitectura noruego, recibieron un cargo del diseño de la gran ópera de Shanghái, en China. El objetivo de esta edificación es atraer audiencia hacia actuaciones tradicionales, experimentales y clásicas.

Esta edificación será construida en el año 2023 y se compone un vestíbulo, pasillos y 3 auditorios. El primer auditorio ofrece 2.000 asientos, el segundo 1.200 y el último 1.000 asientos.

Además, en su interior también ofrece servicios como exposiciones, museos, pequeños cines o incluso restaurantes.

Por otra parte, esta edificación destaca por la posibilidad de abrir los paneles de vidrio para que entre la luz natural. En cambio, por las noches, transforman el edificio en una linterna que ilumina el techo y el horizonte. (A. Muñoz, 2019)



Ilustración 5: Snøhetta's Shanghai Grand Opera House. (A. Muñoz, 2019)

2.1.3. Partes y elementos principales

Una vez analizados los auditorios ya existentes, se recogen las zonas comunes para aplicarlas al auditorio de este proyecto.

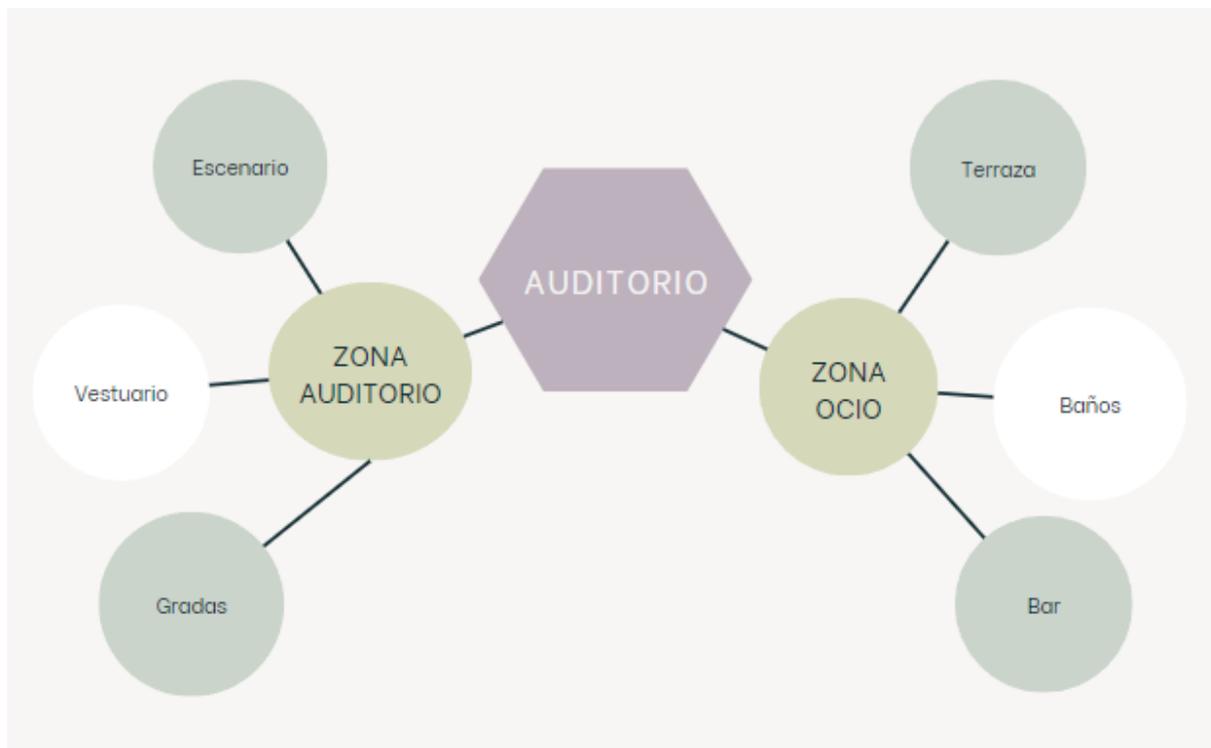


Ilustración 6: Distribución de zonas del Auditorio. Elaboración propia

A continuación, se muestran las partes en las que se compone un auditorio:

- **Escenario**

El escenario es la zona principal del auditorio. En este lugar se lleva a cabo el evento, ya que es el lugar donde los artistas o presentadores ejecutan la actividad. El escenario puede ser variado en cuanto a forma o tamaño y además suele contar con un telón, herramientas de sonido e iluminación variada.

- **Backstage**

En este lugar, los artistas o personas que imparten la conferencia se preparan antes de salir al escenario. Son áreas cómodas y privadas, las cuales es importante que se encuentren ubicadas cerca del escenario.

- **Entrada**

La entrada del auditorio es un lugar donde se encuentra el personal de comprobar las entradas de acceso del público, para asegurarse de que todo el mundo ha obtenido su entrada.

• Gradas

Los asientos son una parte crucial de los auditorios, ya que es la zona donde el público se sienta para contemplar el espectáculo. Es importante utilizar mobiliario cómodo para los usuarios y además, un lugar donde se tenga una buena visibilidad. Generalmente, se suelen utilizar asientos plegables para una mejor limpieza y mantenimiento.

• Baños

Como en cualquier servicio de ocio, un auditorio debe tener baños para todo el público. Debe estar colocado en un lugar accesible y proporcionar comodidad y privacidad a los usuarios.

• Área de descanso: Bar

Por último, también es importante proporcionar servicios de restauración a los usuarios. De esa manera pueden socializar, tomar un aperitivo o beber algo, tanto antes como después del evento.

2.1.3.1. Sonido e iluminación

En este apartado se mencionan dos factores a tener en cuenta en el diseño de un auditorio. Por una parte, se ha de mencionar la importancia de un buen sonido en este espacio.

Hay varios **objetivos** que se deben conseguir a la hora de diseñar la acústica de un auditorio:

- Claridad de las interpretaciones musicales o el habla sin distorsiones por la superposición o el eco.
- Intensidad de los sonidos en los puntos más alejados del escenario.
- Sonidos aislados

Además, es importante tener en cuenta dos factores:

• Tamaño del auditorio

A la hora de diseñar un auditorio se ha de tener en cuenta el tamaño de este, ya que, por ejemplo, una sala pequeña no permite una música tan intensa como una grande, pero se escucha con mucha más claridad.

• Forma del auditorio

Por otro lado, también es importante tener en cuenta la forma de la sala, ya que un espacio con habitaciones cuadradas o alargadas pueden hacer que se formen sonidos indeseables. (aislamientosacusticos, 2021)

En cuanto a la **iluminación**, se debe tener en cuenta otra serie de factores. En este caso, es importante mantener bien iluminado el escenario, ya que es la zona dónde se lleva a cabo la actuación.

2.2. ESTUDIO MORFOLÓGICO: EL ORIGAMI COMO INSPIRACIÓN DE LA FORMA

2.2.1. ¿Qué es el origami?

El origami es un arte que se basa en el plegado (no se utilizan ni tijeras ni pegamento). El origen del origami se remonta a China, desde donde posteriormente se trasladó a Japón, lugar donde se popularizó gracias a los monjes budistas. (*D. Algaba, 2009.*)

Era algo lujoso debido a que el papel era raro y caro, se consideraba un material precioso. Por esta misma razón, se utilizaba en ceremonias religiosas a modo decorativo.

El origami se fue desarrollando en los rituales budistas y luego prosperó en la era de los Bushi donde realizar flores de origami demostraba la amistad. Posteriormente, durante el periodo Edo, la técnica del origami se fue popularizando. Debido a que las técnicas se transmitían de manera oral, sólo han sobrevivido las más básicas. Hoy en día, hay varios modelos de origami muy populares en Japón, como por ejemplo la grulla.

Esta técnica se desarrolló en Europa en el siglo XVIII, debido a que se consideraba enriquecedor para el desarrollo de los niños ya que mejoraba sus habilidades manuales.

Durante los años, se han ido desarrollando diferentes técnicas con materiales y procesos innovadores aplicables a productos o incluso a edificaciones. En el apartado siguiente, se muestran los origamis más conocidos.

2.2.1.1. Ventajas del origami en el ámbito de arquitectura

La utilización de un origami aporta una gran versatilidad de funciones a la propia arquitectura. Este tipo de arquitecturas pueden contener elementos móviles para el plegado o elementos móviles configurables dependiendo la temperatura o la climatización.

Algunos ejemplos de ello se nombran a continuación:

• Adaptabilidad al entorno

Se pueden crear edificios que dependiendo de la temperatura o del estado climático externo se plieguen o se expandan. Esta función aporta un gran beneficio en comparación a las edificaciones tradicionales, ya que por ejemplo en zonas donde el clima es desfavorable puede ser de mucha ayuda. Además de tener funcionalidades prácticas, el origami tiene una estética muy atractiva, y por esta misma razón muchos arquitectos se han basado en ella debido a su belleza.

• Elección de materiales

Debido al avance de la tecnología este tipo de plegados se puede aplicar a muchos tipos de materiales. Esto se consigue gracias a bisagras o procesos de fabricación avanzados.

• Variedad de propiedades mecánicas

Las dobleces que se le aportan al origami permiten aumentar la resistencia y la dureza de los materiales de construcción. Por esta misma razón, crear estructuras con una base de forma del origami es muy interesante para aumentar la durabilidad y reducir los problemas estructurales a la hora de diseñar una edificación.

Según el estudio realizado por Airearq, si las estructuras de origami se estudian correctamente y se crea una forma determinada y unos pliegues definidos, se puede conseguir que la estructura fina tenga una resistencia similar a la de una estructura de hormigón. Este estudio se realizó mediante una lámina de ferrocemento de 2 cm de grosor y al aplicarle la forma del origami se determinó que su capacidad estructural era mucho más eficiente utilizando muchos menos recursos materiales. (airearq, 2018)



Ilustración 7: Estructura diseñada por Airearq

2.2.2. Miura

Este patrón lleva el nombre del científico japonés Miura, quien usó este sistema de estructura para crear sistemas solares cinéticos en el espacio. Este patrón consiste en paralelogramos simétricos que forman en dos direcciones una configuración en zigzag.

Esta configuración permite la apertura de patrones en dos direcciones. En términos arquitectónicos, es muy importante continuar con el desarrollo de estos tres patrones básicos para producir nuevas variaciones de la forma. Tiene una forma muy interesante, ya que es capaz de extenderse y plegarse totalmente hasta quedar en un único plano. (G. Curletto, 2016)



Ilustración 8: Patrón Miura en arquitectura. Photo by form PxHere

A continuación, se muestran las características principales de este origami:

- **Plegado:** Este origami se caracteriza por plegarse de manera lineal, es decir, al plegarse, la estructura se unifica en un único plano lineal, a diferencia de la versión yoshimura. Este patrón permite generar una estructura de dos posiciones: Compacta alargada o extendida en un plano.



Ilustración 9: Miura en papel Tachi, T. (2009). Rigid-Foldable Generalized Miura-ori

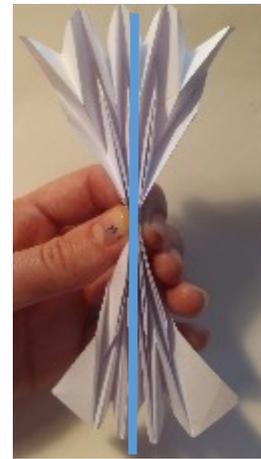


Ilustración 10: Plegado de Miura-Ori. Elaboración propia

2.2.3. Yoshimura

En este caso, es similar a miura ori, pero está compuesto por cuadrados. También se caracteriza por poderse plegar en el eje vertical y no en el horizontal, como en el caso de miura. Principalmente se utiliza en arquitectura, ya que hace que la estructura de los edificios sea mucho más resistente que uno convencional, debido a que los pliegues aumentan la resistencia y generan una estructura mucho más firme.



Ilustración 11: Gallery of Abu Dhabi Investment Council New Headquarters—Al Bahr Towers

Una variación de este patrón se refleja en la transformación de los paralelogramos en trapezoides, lo que permite la fabricación de estructuras plegables cóncavas o convexas.

A continuación, se muestran las características principales de este origami:

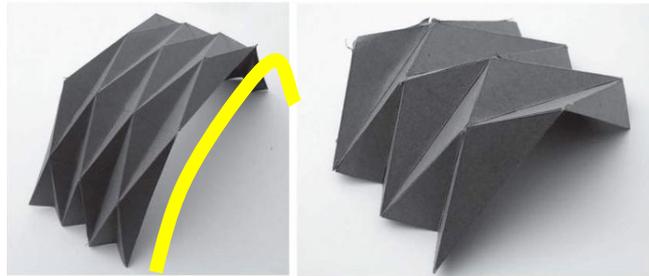


Ilustración 12: Plegado curvo de Yoshimura

· Plegado

Este origami permite hacer un plegado algo diferente al de Miura, ya que antes de plegarse del todo genera una especie de puente, es decir, en vez de doblarse de manera lineal, se genera una curvatura. Por otra parte, también tiene dos posiciones similares a Miura: Plegado en forma de arco o extendido sobre un plano.

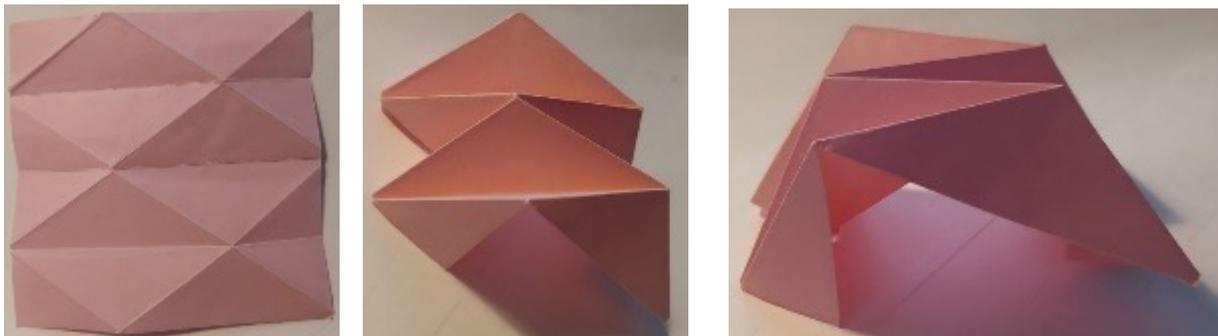


Ilustración 13: Proceso de plegado de Yoshimura. Elaboración propia

· Resistencia

Los pliegos que se le aplican a este origami consiguen que la estructura sea mucho más firme y resistente que una estructura plana. Esto sucede porque al aplicarle pliegues a la estructura, las fuerzas se reparten entre las diferentes dobleces.

2.2.4. Bullet proof origami

Este diseño fue desarrollado por el Grupo de Investigación de Mecanismos de Cumplimiento (CMR) de la Universidad Brigham Young (BYU).

La característica principal del patrón de plegado de Bullet-proof es su eficacia como barrera debido a sus ángulos, que brindan protección frontal y lateral.

Cuando está plegado, el origami es muy compacto y, por lo tanto, muy fácil de guardar.

Este origami fue creado para que los servicios de emergencia pudieran tener una protección oculta en situaciones difíciles. Tiene 12 capas de kevlar, el material que se utiliza en los equipos de protección.

Su característica es que es mucho más ligero que los escudos habituales. Se puede transportar con mucha facilidad y puede ofrecer protección a 3 personas al mismo tiempo.

Por ejemplo, es capaz de retener balas de pistolas de 9 mm, 357 Magnum y 44 Magnum. (BYU, 2017)

A continuación, se muestran las características principales de este origami:

- **Compacidad**

Este origami destaca por su capacidad de compacidad debido a que se puede almacenar en muy poco espacio y a su vez, poderse extender con facilidad y rapidez en pocos segundos.

- **Resistencia**

Los pliegues que se le aplican a este origami además de permitir que se doble por esa zona le aportan mayor resistencia a los impactos, ya que permite reforzar la estructura.

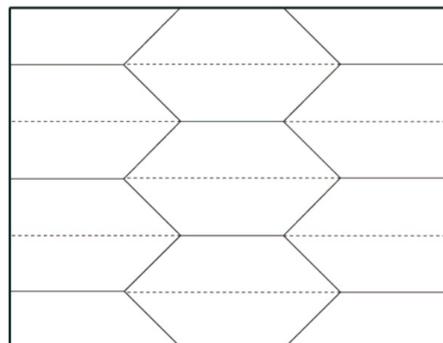


Ilustración 14: Esquema de plegado de Bullet-proof origami. (BYU, 2017)



Ilustración 15: Bullet-proof origami. (BYU, 2017)

2.2.5. Origami fórceps

Este diseño fue desarrollado por el Grupo de Investigación de Mecanismos de Cumplimiento (CMR) de la Universidad Brigham Young (BYU).

El material del filamento utilizado determinará las propiedades de fatiga y flexión del mecanismo. Los filamentos más flexibles producen un mecanismo que resiste un mayor uso y requiere menos fuerza para actuar. En cambio, al usarse materiales más rígidos, soportarán menos usos, debido a que será más frágil y se deberá utilizar más fuerza. (Oriceps, 2013)

A continuación, se muestran las características principales de este origami:

- **Simplicidad**

Esta estructura se genera simplemente creando 4 dobleces. Esto genera una estructura capaz de sostener objetos con únicamente esta cantidad de dobleces, por lo que la convierte en un diseño minimalista.

- **Transmisión de fuerzas**

Además, destaca por su capacidad de transmisión de fuerzas, ya que aplicando muy poca presión es capaz de sostener objetos de mayor peso e incluso transportar cargas sin esfuerzo. Estas características se generan debido a las dobleces específicas del origami.

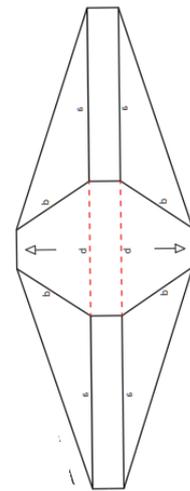


Ilustración 16:
Esquema de plegado
de Oriceps (Oriceps,
2013)

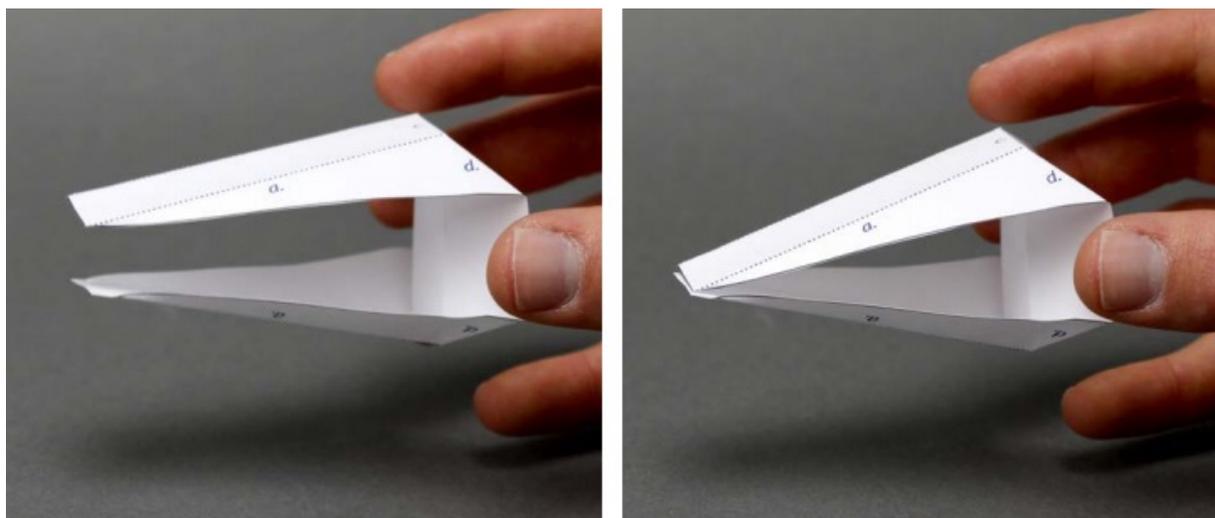


Ilustración 17: Origami fórceps (Oriceps, 2013)

2.2.6. Pentagonal high tower spring

Este diseño fue desarrollado por el departamento de ingeniería mecánica de la Universidad Brigham Young.

Su característica es su capacidad de comprimirse y expandirse, manteniendo el hueco en su interior independientemente de su longitud. (sphere360, 2016)

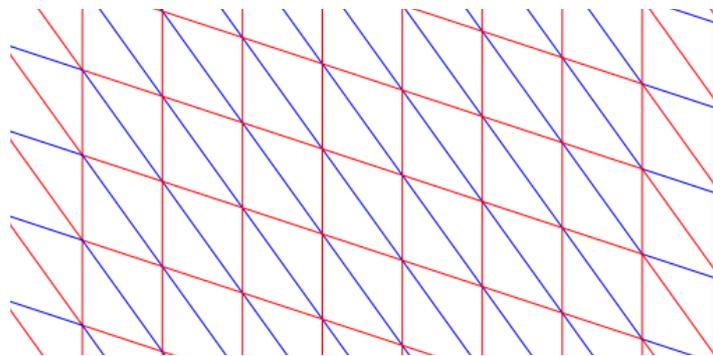
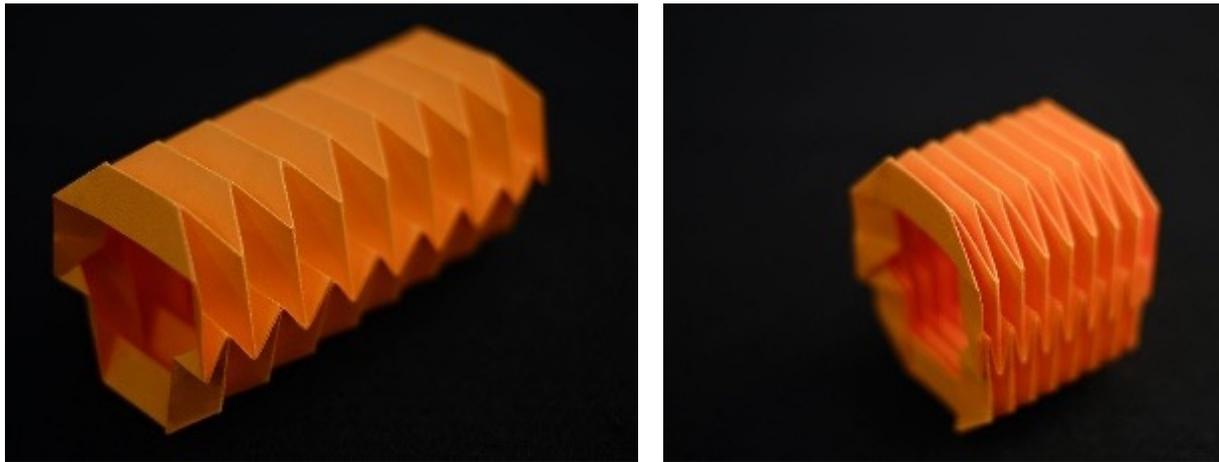


Ilustración 18: Esquema de plegado de Pentagonal High tower Spring

A diferencia de las figuras anteriores, esta estructura tiene que ser pegada para realizar el cilindro base de la figura.

A continuación, se muestran las características principales de este origami:

· Plegado

Este origami se caracteriza con su capacidad de plegado en un espacio reducido, similar a los origamis anteriores, aunque con la diferencia de que en este caso pasa de una estructura tridimensional a una estructura plegada.

• Firmeza

Debido a que esta estructura contiene una gran cantidad de pliegues y se utiliza pegamento para realizar el cilindro base de la figura, esta estructura es de las más resistentes tanto plegada como desplegada.

2.2.7. Starshade NASA

Este origami fue diseñado para plegarse muy compacto y desplegarse fácilmente.

Como su nombre indica, este origami fue creado por la NASA para proteger las cámaras de los telescopios de luz exterior y evitar que se vean afectados por la luz de las estrellas al estudiar los planetas del universo. (NASA, 2022)

A continuación, se muestran las características principales de este origami:

• Plegado

Esta estructura es capaz de pasar de una superficie plana a una estructura hexagonal en forma de vaso. Es una figura muy interesante debido a que se pliega como si fuese un molinillo.



Ilustración 19: Starshade. (NASA, 2022)

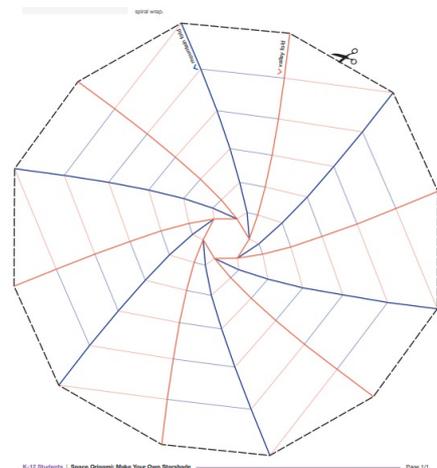


Ilustración 20: Esquema de Starshade. (NASA, 2022)

2.3. ESTUDIO DE ACERCA DE LA VISUALIZACIÓN DEL PROYECTO: EL USO DE LA REALIDAD AUMENTADA EN ARQUITECTURA

A continuación, se muestra la definición de realidad aumentada, las herramientas del mercado existentes y varios ejemplos prácticos representativos de realidad aumentada.

2.3.1. ¿Qué es la realidad aumentada (RA)?

La realidad aumentada es una tecnología que conecta el mundo físico y el digital gracias a herramientas como gafas de realidad virtual o dispositivos móviles. De esta manera se consigue optimizar la eficiencia del trabajo diario, la resolución de los problemas y facilita la preparación para el futuro. (Microsoft, 2021)

Mediante esta herramienta se consiguen aplicar elementos visuales digitales, sonidos o estímulos sensoriales en un entorno del mundo real, consiguiendo ofrecer una manera mucho más interactiva, dinámica e inmersiva para aplicar en diversos entornos como el laboral o el de ocio.

Podemos encontrar dos tipos de RA (Jasche et al., 2021):

- Basada en marcadores: Detecta objetos que utiliza como puntos de referencia para colocar el modelo.
- Sin marcadores: Utiliza un algoritmo de reconocimiento que, mediante la cámara, el acelerómetro y el GPS se orienta y coloca el modelo en el entorno del mundo real.

2.3.2 Algunos programas de RA utilizados en el diseño

A continuación, se muestran varias herramientas de realidad virtual y realidad aumentada.

2.3.2.1. Fologram

Fologram es una herramienta para visualizar objetos en AR tanto de Grasshopper como de Rhinoceros. Se puede utilizar en HoloLens 1, HoloLens 2, iOS y Android. Además, permite editar los parámetros de Grasshopper a tiempo real mientras se visualiza el objeto mediante la cámara del dispositivo. Para su utilización, únicamente se debe instalar el plugin de Grasshopper y descargar la aplicación al dispositivo. Es fácil, intuitivo y permite un gran abanico de posibilidades a la hora de presentar proyectos o visualizar objetos en realidad aumentada. (Fologram, 2018)

2.3.2.2. UE

Unreal Engine es una herramienta comúnmente utilizada en la creación de videojuegos. Fue desarrollado por Epic Games en el año 1998. Este programa se utiliza en videojuegos, aunque

también tiene otros usos como la visualización de arquitectura, realidad virtual, realidad aumentada o realización de renderizado y vídeos. Es un programa muy utilizado en la industria de videojuegos debido a su sencillo código escrito en C++ y a su gran grado de portabilidad. (Unreal Engine, 1998)

2.3.2.3. Unity

Unity es un motor gráfico de creación de videojuegos. Se utiliza en la industria de videojuegos debido a que permite una gran cantidad de posibilidades. Esta herramienta también se utiliza en el cine, animación, arquitectura o realidad virtual. En este caso, está desarrollado en C#. (Martínez, 2021)

2.3.3. Ejemplos de realidad aumentada

A continuación, se muestran varios ejemplos de exposiciones o aplicaciones que utilizan la realidad aumentada como base:

2.3.3.1. Pokémon GO

El Pokémon GO fue uno de los primeros juegos en aplicar la realidad aumentada en dispositivos accesibles al público (como un dispositivo móvil).

Este juego consiste en cazar Pokémon distribuidos en diferentes localizaciones, mientras el usuario va moviendo el dispositivo para encontrar y capturar el Pokémon con ayuda de la cámara. La clave del éxito de este videojuego es mezclar la realidad aumentada a través de las cámaras del dispositivo con la utilización de un mapa real para cazar Pokémon. (Ipanema, 2017).



Ilustración 21: Pokémon GO. (Ipanema, 2017)

En el caso concreto del proyecto que se muestra en este documento, es interesante la utilización de esta tecnología aplicada a la arquitectura, ya que permite la visualización en realidad aumentada y además también destaca por la posibilidad de interacción con el dispositivo y contenido.

2.4. ANALISIS DE PROYECTOS DE REFERENCIA

2.4.1. Análisis de estructuras diseñadas mediante origami

En este apartado, se muestran diferentes estructuras diseñadas a través del origami. Estas estructuras se caracterizan por sus dobleces y su estilo moderno. (Zorrozua Asociados, 2021)

2.4.1.1. Carlo Ratti: Edificio histórico italiano

Carlo Ratti y el arquitecto Italo Rota han transformado un hospital del siglo XVIII en un nuevo centro cultural en moderna, Italia. Está compuesto por un techo cinético del estilo de origami que aporta un carácter dinámico al edificio. De esta forma, se permite abrir y cerrar el techo. (M. Muñoz, 2022)

Esta configuración permite que en caso de que el entorno cambiante no sea favorable, se puede abrir y cerrar, complementando la arquitectura moderna con la antigua. De esta manera, se busca generar una configuración dinámica reversible y adaptable a la transformación continua.



Ilustración 22: Carlo Ratti: Edificio histórico Italiano. (M. Muñoz, 2022)

2.4.1.2. Al Bahar Towers

Las torres de Al Bahar Towers son edificios de oficinas de 25 plantas que destaca por su protección solar gracias a su diseño de celosía tecnológica.

Debido a la radiación del lugar, las ganancias técnicas de la fachada son elevadas, por lo que se decidió incorporar esta superficie externa para evitar el paso de luz y radiación. (Blog Eraikal, 2013)

Esta celosía está inspirada en la arquitectura tradicional islámica (mashrabiya) y está compuesta por tecnología domótica y móvil que permite generar una barrera solar dinámica. Para esto, utiliza alrededor de 1.000 elementos dinámicos que a través de un sistema hidráulico es capaz de plegar los paneles. (Dazne, 2018)

Este diseño basado en origami destaca por varias cuestiones:

· **Diseño modular:**

Este diseño destaca por su diseño triangular modular y repetitivo. El diseño modular permite una serie de ventajas como la capacidad de actualización, flexibilidad o facilidad de servicio, además de poder reemplazar o agregar módulos al sistema sin influir al resto de módulos. Es interesante la utilización del diseño modular por sus beneficios medioambientales y sus infinitos diseños y formas arquitectónicas. (Algeco, 2015)

· **Dinamicidad y plegado**

La dinamicidad y el plegado del diseño permite cambiar la forma de su estructura, en este caso de la piel del edificio, consiguiendo la protección hacia los rayos solares. Esta característica es interesante ya que debido a la localización en la que se encuentra. Le aporta la protección necesaria manteniendo una estética atractiva y un sistema funcional.

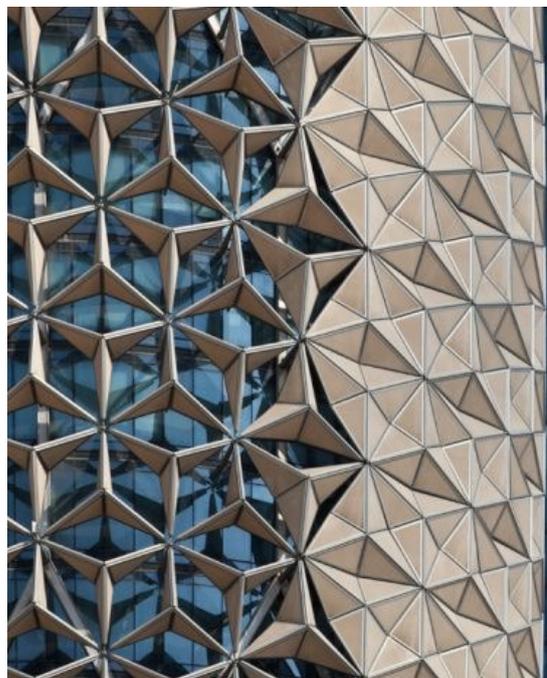
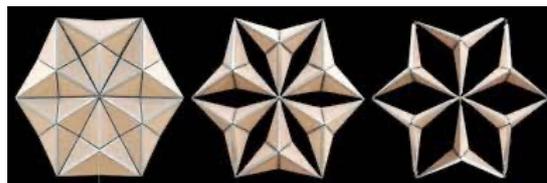


Ilustración 23: Al Bahar Towers. (Dazne, 2018)

2.4.1.3. Recinto ferial de Cuenca

Esta edificación está hecha de tal forma que se genera una malla estructural con forma de origami. (Moneo Brock Studio, Arquitectos, 2012)

Está compuesto por módulos irregulares que al juntarlos se forma una especie de bosque.

Se ha fabricado con suelo radiante y cristal de baja emisividad y 45% de opacidad en la cubierta.

Además de lo anterior, se fomenta la ventilación natural para refrescar en verano y efecto invernadero en invierno.



Ilustración 24: Recinto ferial de Cuenca. (Moneo Brock Studio, Arquitectos, 2012)

La principal característica del modelo es el uso del diseño modular. En este caso concreto, permite varias posibilidades de diseño:

· **Repetición de módulos**

Al ser todos los módulos iguales, permite colocar un número infinito de ellos sin necesidad de diseñar toda la estructura al completo. De esta forma, se puede añadir o reducir la cantidad de módulos sin necesidad de modificar el conjunto de la estructura.

· **Infinidad de diseños**

Al generar una estructura compuesta por piezas individuales, se pueden generar una infinidad de diseños simplemente cambiando la orientación de los módulos. Esta repetitividad modular permite que sin necesidad de cambiar los diseños individuales se consiga una amplia variedad de diseños en cuanto al conjunto.

2.4.1.4. Capilla temporal para las diaconisas de St -Loup

Esta estructura está desarrollada con paneles de madera, las cuales permiten cubrir grandes áreas de secciones finas. Se encuentra construida directamente en el suelo y está diseñada gracias al origami de Yoshimura. Gracias a las dobleces irregulares de tanto el exterior como el interior se genera una armonía en el ambiente. (LOCALARCHITECTURE, 2018)



Ilustración 25: Capilla temporal para las diaconisas de St Loup. (LOCALARCHITECTURE, 2018)

· **Resistencia**

Las diferentes dobleces que se le realizan al origami aportan una mayor resistencia a la estructura. Las dobleces que se utilizan en el origami son muy útiles debido a que, en el caso de estructuras con espesores reducidos, aportan una mayor resistencia al impacto y permiten sujetar la estructura sin que esta se caiga.

2.4.1.5. Estación de Oriente de Lisboa

Esta estación se ha fabricado con 3 pisos y está formada por techo acristalado que crea una estación amplia, elegante, imponente y ligera. Calatrava utilizó como eje la vía del tren, formada por cuatro andenes. (Wikiarquitectura, 2014)

Además, está formada por geometrías simétricas y repetitivas que generan un orden en el lugar. También se caracteriza por el uso de la madera laminada que aporta un estilo moderno.

• Módulos

En este caso, la utilización de módulos es interesante, ya que, de esta forma, al ser repetitivo, en caso de que una estructura se estropee o se quieran añadir nuevas, no es necesario reparar la estructura al completo.



*Ilustración 26: Estación de oriente de Lisboa.
(Wikiarquitectura, 2014)*

2.4.2. Los espacios arquitectónicos virtuales

En este apartado se muestra desde el concepto de los **espacios arquitectónicos virtuales** hasta las diferentes aplicaciones que tiene tanto a nivel ingenieril como arquitectónica, mostrando varios ejemplos.

Los espacios arquitectónicos virtuales son entornos interactivos que se encuentran adaptados para internet. Representan escenarios inventados o reales que han sido modelados mediante tecnologías de modelado 3D y de realidad virtual o aumentada.

Estos espacios inmersivos son aplicables a una gran variedad de ámbitos: ciencia, arquitectura, diseño, arte, educación, etc.. y tienen el objetivo de enseñar los objetos, conceptos o productos al usuario de una forma interactiva.

De esta manera, el usuario puede visualizar el contenido virtual de forma más amena interactuando con ella. (Marcos Alba, 2009)

Además, permite visualizar el interior o exterior de estas obras arquitectónicas interactuar con ellas o sus elementos. Este tipo de espacios tienen una gran variedad de utilidades:

- Presentar al cliente de manera visual el resultado final de un espacio arquitectónico antes de comenzar la obra.
- Observar los posibles fallos que se encuentren gracias al modelado y visualizado del espacio arquitectónico.
- Presentar al usuario conceptos interactivos de manera virtual sin tener que construirlo físicamente mediante maquetas virtuales.

El uso de este tipo de espacios es muy atractivo debido a su innovación y su dinamicidad, por lo que las personas tanto jóvenes como adultas son el usuario idóneo para este tipo de actividades.

Para la realización de estos espacios arquitectónicos virtuales se hace uso de la realidad virtual o aumentada. A continuación, se muestran varios ejemplos de espacios arquitectónicos virtuales.

2.4.2.1 Uso de maquetas digitales de realidad aumentada para el proceso de diseño arquitectónico y la presentación interactiva de proyectos en la carrera de Arquitectura

En este proyecto se propone el uso de máquinas virtuales mediante realidad aumentada para presentar proyectos arquitectónicos en vez de utilizar maquetas físicas. Las maquetas virtuales cuentan con varias ventajas en comparación a las físicas, ya que permite la interacción del modelo. (Ruiz, Rocío et al., 2014)

Se considera un ejemplo interesante de uso de realidad aumentada para el ámbito arquitectónico, ya que permite al usuario interactuar con la maqueta de manera mucho más dinámica e inmersiva.

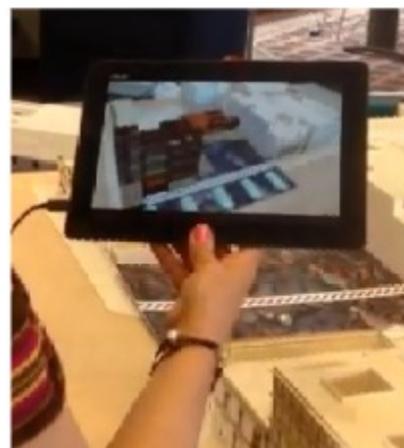


Ilustración 27: Maquetas digitales de realidad aumentada para el proceso de diseño arquitectónico. (Ruiz, Rocío et al., 2014)

2.4.2.2. Arenas romanas en realidad aumentada

Este ejemplo consiste en una arena romana ejecutada en realidad aumentada.

Debido a que el anfiteatro ubicado en Bézier está en estado de ruinas y no se ha decidido restaurar, se realizó una transacción en realidad aumentada para mediante unas tabletas poder



Ilustración 28: Tablets con realidad aumentada (Beziers, 2021)

observar lo que antes era el anfiteatro romano ubicado en ese punto de la ciudad.

Esta atracción consiste en utilizar unas tabletas de alquiler que contienen el programa necesario para poder vivir la experiencia. Al recorrer la ciudad mirando a través del dispositivo, se puede obtener información interesante respecto a la ciudad y al anfiteatro. Además, es interactivo, ya que a medida que te mueves por el espacio, puedes ver diferentes perspectivas del anfiteatro. (Beziers, 2021)

2.4.2.3. Pabellón de EE. UU. en la Bienal de Venecia de Greg Lynn

En esta exposición Greg Lynn Crea una instalación de centro de transporte y fábrica industrial aplicada a la realidad virtual mediante unas gafas de Microsoft HoloLens. En esta exposición se podía observar la experiencia de la mezcla entre contenido digital y físico, de tal manera que se podía obtener una experiencia inmersiva sin la necesidad de tener el espacio físico. Es una técnica ideal para los arquitectos, ya que puede utilizarse como una herramienta de diseño complementaria a las actuales, que permite observar los resultados finales antes de él realizar la arquitectura físicamente. (Dezeen, 2016)

En el caso concreto del proyecto que se muestra en este documento, este ejemplo es muy interesante debido a que se busca conseguir algo similar pero con otro modelo y diseño. Es muy interesante la utilización de la realidad aumentada en arquitectura para observar el diseño e interactuar con el mismo sin la necesidad de que esté construido físicamente.

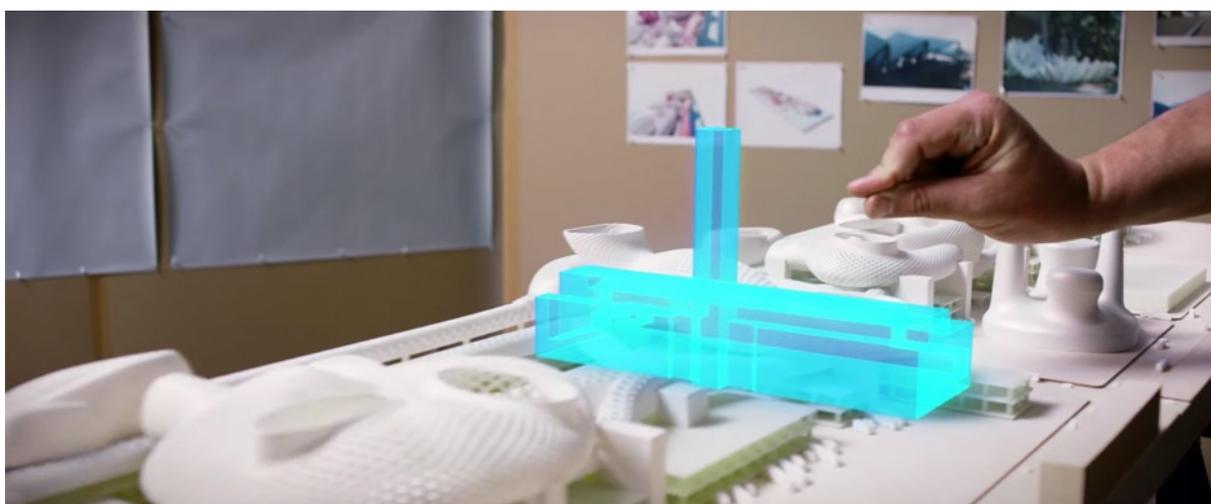


Ilustración 29: Pabellón de Greg Lynn. (Dezeen, 2016)



Diseño de un auditorio

para 130 personas
en la localidad de Trokoniz
utilizando técnicas de origami
y herramientas de realidad aumentada

3

OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

- 3.1. Objetivo general
- 3.2. Objetivos específicos

3. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

METODOLOGÍA SMART



Ilustración 30: Metodología SMART. Elaboración propia

Antes de comenzar con el diseño del auditorio, se han de establecer una serie de objetivos a cumplir durante el desarrollo. Para establecer estos objetivos se utiliza la metodología Smart, la cual busca definir detalladamente las características de los objetivos para conseguir resultados óptimos.

Para ello se tienen en cuenta 5 características:

- **Específico:** Es importante especificar detalladamente los objetivos para definir nuestro proyecto en mayor profundidad. En el caso de nuestro proyecto, el diseño de un anteproyecto para 150 personas ubicado en el pueblo de Trokoniz.
- **Medible:** También se considera fundamental la definición de unas pautas medibles, es decir, en nuestro caso que puedan comprobarse con herramientas de modelado como Rhinoceros y que sean datos objetivos.
- **Alcanzable:** Además, se deben de definir unos objetivos alcanzables en aspectos como esfuerzo, tiempo...
- **Relevante:** Se ha de tener en cuenta que el objetivo debe ser relevante, es decir, debe estar bien especificado y ser significativo respecto al proyecto.
- **Tiempo:** Por último, en cuanto al factor tiempo, se deben especificar los plazos para la realización de los objetivos y comprobar si esto es alcanzable o no.

Tras la definición de la metodología a seguir para la definición de los objetivos, se plantean tanto el objetivo general como los específicos.

3.1. OBJETIVO GENERAL

La causa del desarrollo de este proyecto se debe a la búsqueda de nuevos estilos dinámicos de arquitectura y ruptura con la tipología estática que la define.

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar un auditorio para 130 personas de 2.400 m² ubicado en la localidad de Trokoniz.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A continuación, se enumeran los diferentes objetivos específicos:

- Aplicar el origami como forma de la estructura
- Aprovechar las características de variabilidad del origami en nuestra estructura
- Aprovechar las características de compacidad del origami en nuestra estructura
- Aplicar la realidad aumentada como forma de visualización



Diseño de un auditorio

para 130 personas
en la localidad de Trokoniz
utilizando técnicas de origami
y herramientas de realidad aumentada

4

DESARROLLO ESPECIFICO DE LA CONTRIBUCIÓN

- 4.1. Desarrollo de programa de necesidades
- 4.2. Brief
- 4.3. Elaboración de alternativas⁴⁴
- 4.4. Selección de la propuesta final
- 4.5. Desarrollo de estructura

4. DESARROLLO ESPECIFICO DE LA CONTRIBUCIÓN

4.1. DESARROLLO DE PROGRAMA DE NECESIDADES

En esta sección se procede a seleccionar las características principales del proyecto.

Este auditorio está inspirado en un anfiteatro romano, pero con características modernas. A continuación, se muestra punto por punto las características que definen al auditorio:

- Este auditorio se diseña con el objetivo de realizar eventos como conciertos o ponencias y a su vez, que el usuario pueda disfrutar del aire libre o incluso de beber o tomar un aperitivo mientras está en el evento.
- Esta diseñado para albergar a 130 usuarios al mismo tiempo. Este número de usuarios es reducido debido a que se tiene planeado generar eventos de poca multitud para conseguir mayor disfrute del usuario.
- Está dividido en varios espacios: El auditorio y las gradas, el vestuario, la entrada principal, el bar, el baño y la terraza. En total debe abarcar 2 400 m².
- La característica principal de este auditorio es que se encuentra al aire libre. Este se ha diseñado así debido a que es muy atractivo, principalmente para en la época de verano realizar espacios con posibilidad de estar al aire libre.
- Debe ser dinámico y adaptarse a las distintas circunstancias ambientales o suplir las necesidades del usuario.

Este anfiteatro se ubica en la localidad de **Trokoniz**, ubicada en el **País Vasco**. Es un lugar que se compone de campo y bosque en sus alrededores, por lo que se considera un buen emplazamiento para realizar este anfiteatro al aire libre.

Este auditorio se ha diseñado con forma hexagonal debido a que es una forma muy interesante a la hora de diseñar estructuras.

La arquitectura hexagonal permite una serie de beneficios:

- El sonido se reparte de igual manera por todas las gradas, debido a que son equidistantes al escenario. Gracias a esto, todos los usuarios, independientemente de la grada en la

que se encuentren, pueden escuchar el evento de manera correcta y sin problemas de sonido.

- La forma hexagonal permite aplicar la cúpula del exterior. Si la forma del auditorio no fuese hexagonal, la cúpula del exterior no quedaría acorde a la estructura del auditorio, por lo que estéticamente quedaría en desacuerdo con el resto del auditorio
- De la misma manera que el sonido, si se realiza el auditorio hexagonal, es más sencillo generar una iluminación repartida, debido a que los puntos de luz pueden cubrir más fácilmente el total de la edificación.
- Por último, se considera que realizar esta forma genera una mayor accesibilidad al espacio, ya que es más fácil para dirigir a los usuarios hacia sus asientos y que no se generen obstrucciones.

4.2. BRIEF

Una vez realizado el análisis del estado del arte en cuanto a las exposiciones virtuales, realidad aumentada y origami, se han llegado a una serie de conclusiones:

- Es muy interesante el uso **de los espacios arquitectónicos virtuales** tanto a nivel profesional como de ocio debido a que es un método de visualización alternativo, dinámico e innovador. Permite visualizar la arquitectura virtual en cualquier lugar que se desee mediante un dispositivo, sin la necesidad de acudir a un lugar fijo. Además, este tipo de visualización (dependiendo del contenido) están dirigidas para público de cualquier edad.
- El **origami** da la posibilidad de crear estructuras mediante plegados básicos o complejos. Además, este tipo de patrones aporta a la estructura buenas propiedades mecánicas, capacidad de movimiento y adaptabilidad al entorno. Gracias a esta metodología, se consigue que la estructura pueda ser inteligente y se adapte a todo tipo de situaciones. Por esta razón, se considera el estilo estético idóneo para realizar este proyecto.
- Las **estructuras basadas en origami** son muy interesantes tanto a nivel estético, funcional y mecánico. Al estar generadas por patrones de origami, son capaces de plegarse o desplegarse fácilmente y pueden ser muy compactos, por lo que se considera un estilo arquitectónico innovador. Además, este tipo de estructuras se pueden generar con una gran variedad de materiales
- La **realidad aumentada** aporta una manera de visualizar contenido innovadora y diferente a la tradicional. Este método permite visualizar elementos o modelos en un dispositivo móvil o gafas virtuales en tres dimensiones. Además, visualizar estos modelos, permite interactuar con el entorno tanto físico como virtual tanto en el propio emplazamiento como en otro lugar.

4.3. ELABORACIÓN DE ALTERNATIVAS

Una vez definido el tema qué queremos tratar y especificadas las partes en las que se compone y los aspectos para tener en cuenta en su diseño, se procede a diseñar varios anteproyectos de nuestro auditorio. Los modelos de estos anteproyectos se encuentran en el **Anexo A: Borradores del Anteproyecto.**

4.3.1. Primer borrador

El primero anteproyecto consiste en una cúpula plegable y desplegable con forma del origami Yoshimura. Como se menciona en las características generales, se plantea que la cúpula se encuentre en un espacio hexagonal. Además de su imponente estética, esta estructura puede ser muy interesante a la hora de realizar actividades multidisciplinarias, es decir, se puede mantener este espacio abierto cuando se desee, pero en caso de haber lluvias o mal tiempo tener la posibilidad de cerrarlo. Esta opción es interesante tanto a nivel estético como práctico debido a la adaptabilidad que aporta a la estructura.

Como se muestra en el boceto, consiste en una cúpula con la capacidad de apertura y cierre en la que los usuarios se colocan alrededor para observar el evento. En la segunda imagen se puede observar la apertura y cierre de la cúpula. Se colocan 2 cascaras simétricas que se unen al cerrarse y forman la semiesfera.

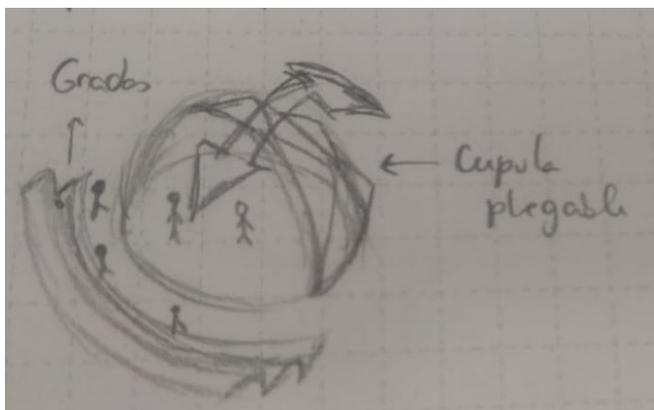


Ilustración 31: Boceto 1 borrador.
Elaboración propia

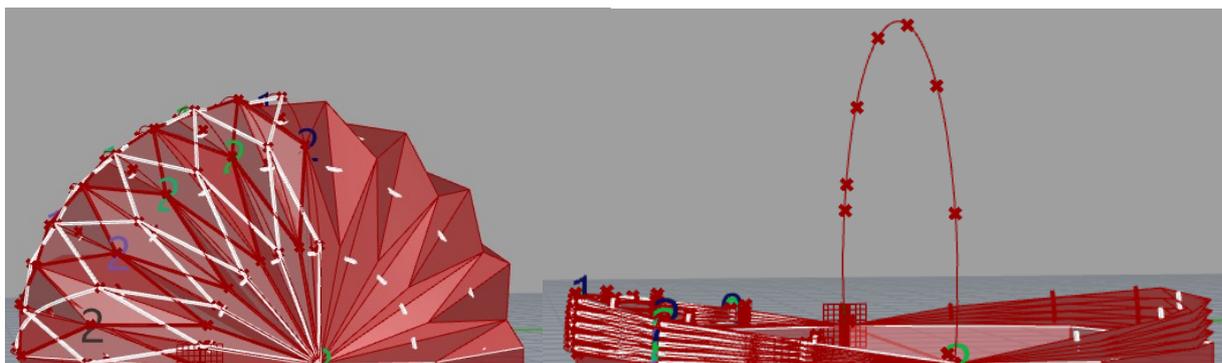


Ilustración 32: Modelo de Grasshopper del 1 borrador. Elaboración propia

Este primer borrador se ha planteado el uso del origami Yoshimura, mencionado en el apartado del Estado del arte y análisis del origami. Se plantea el uso de Yoshimura pegando los extremos entre sí para conseguir la forma semiesférica.

Se ha realizado una maqueta a pequeña escala con papel para comprobar la forma y estética de la configuración de este origami.

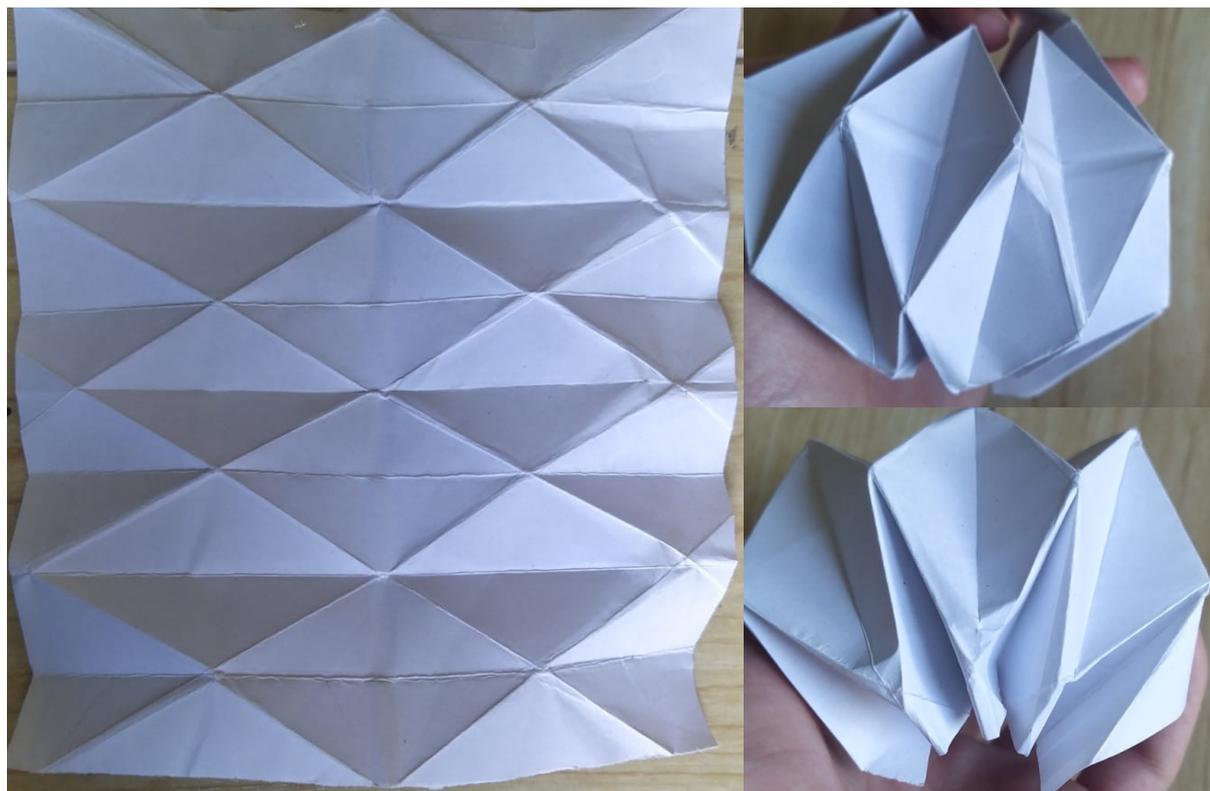


Ilustración 33: Maqueta a pequeña escala del 1 borrador. Elaboración propia

Por otra parte, también se crea un modelo en 3 dimensiones a partir de Grasshopper.

Para ello, se realiza una curva base a partir de construir los puntos de los extremos y la creación de un arco de 3 puntos, tal y como se muestra en la imagen.

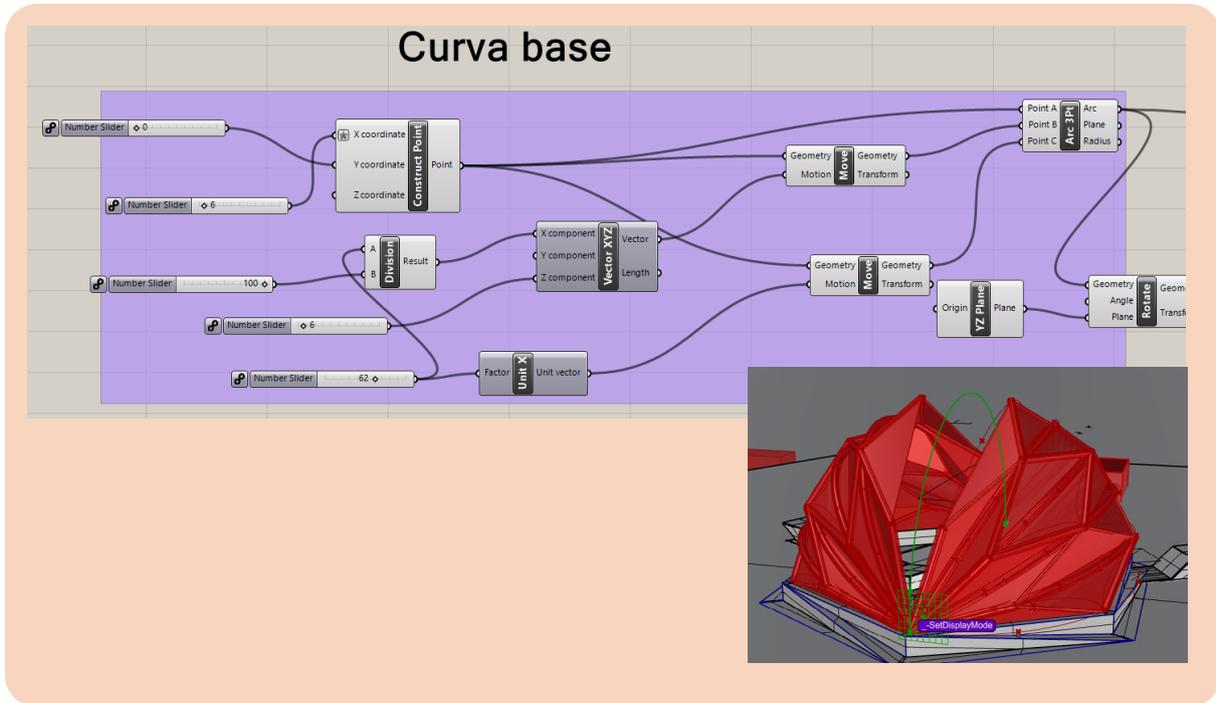


Ilustración 34: Cúpula. Paso 1. Elaboración propia

Posteriormente se crean series de esta curva mediante rotación y series y se selecciona las paredes impares con cull pattern.

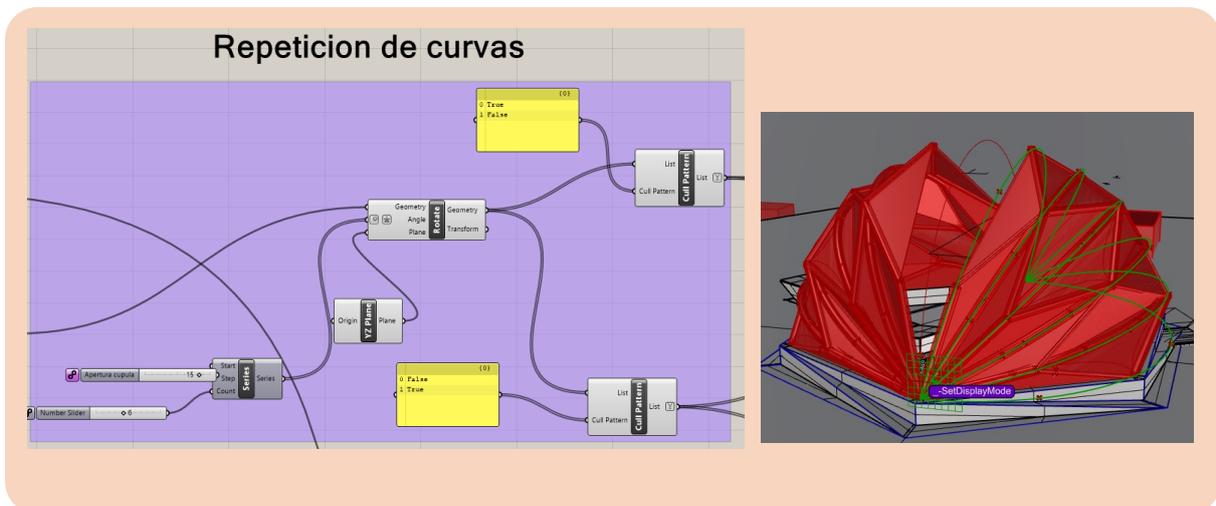


Ilustración 35: Cúpula. Paso 2. Elaboración propia

Las curvas previamente seleccionadas como pares e impares se dividen en varios puntos con divide curve .

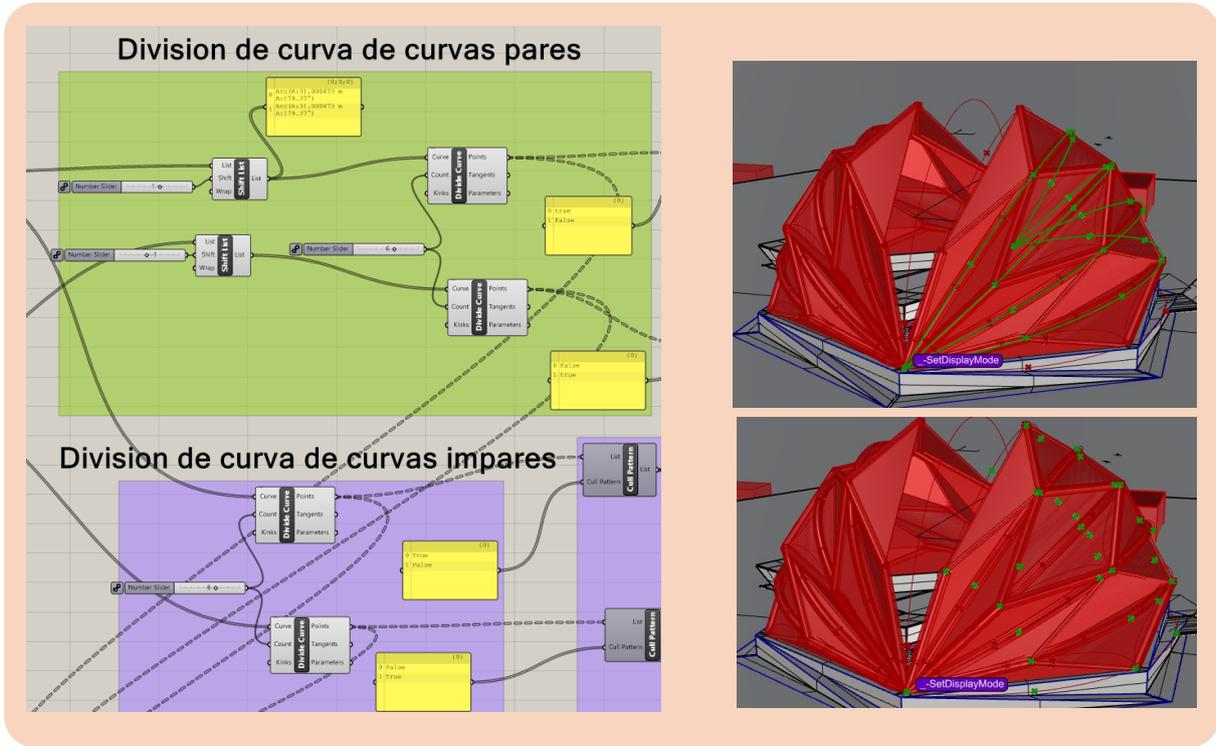


Ilustración 36: Cúpula. Paso 3. Elaboración propia

Los puntos de las líneas pares como impares se dividen también en pares o impares y se unen a los puntos de las demás líneas dependiendo de su paridad.

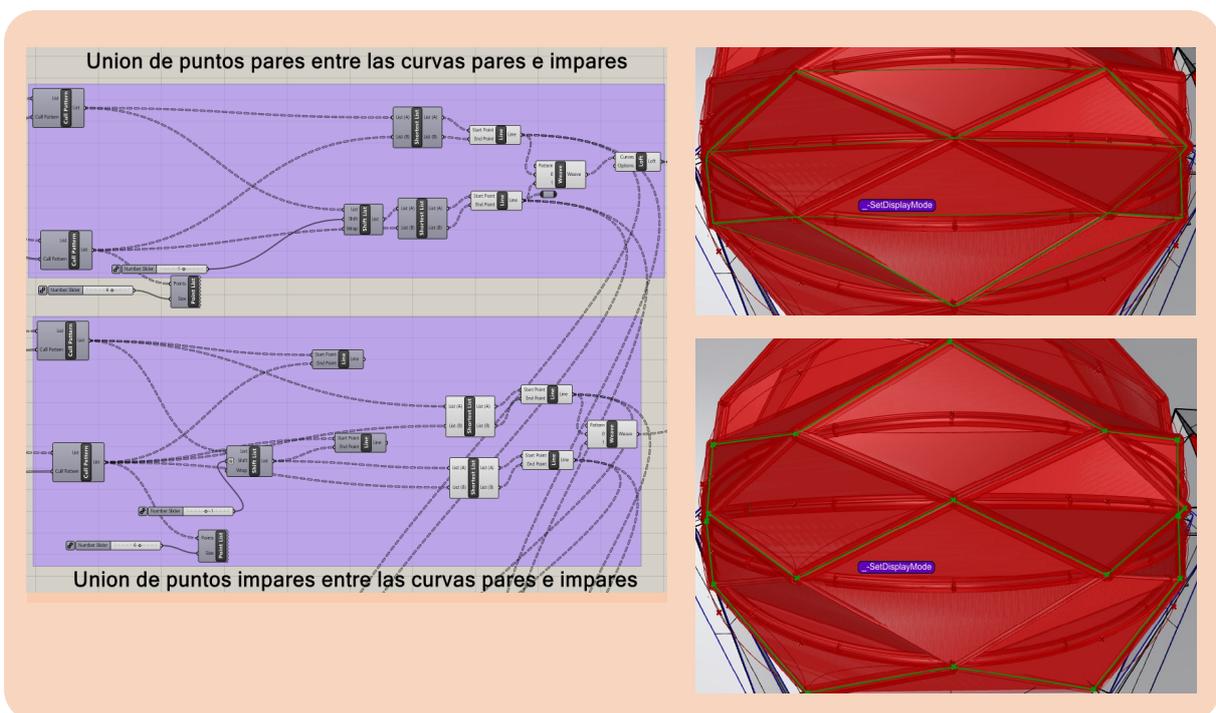


Ilustración 37: Cúpula. Paso 4. Elaboración propia

4.3.2. Segundo borrador

El segundo anteproyecto consiste en un toldo abatible que se enrolla sobre un eje diseñado mediante el origami de starshade y high tower spring. Este diseño es capaz de enrollarse sobre un eje y a su vez plegarse con facilidad. Esta estructura permite generar un espacio al aire libre, pero con la capacidad de taparlo en caso de mal tiempo, como en el caso del borrador 1.

En este caso se plantea un auditorio hexagonal con el toldo en medio. Las gradas se dispondrían en los laterales del hexágono de manera escalonada alrededor del centro del hexágono, como en el boceto que se presenta a continuación. Esta variante es similar al anterior, aunque cambiando la estética y presentando una morfología interesante.

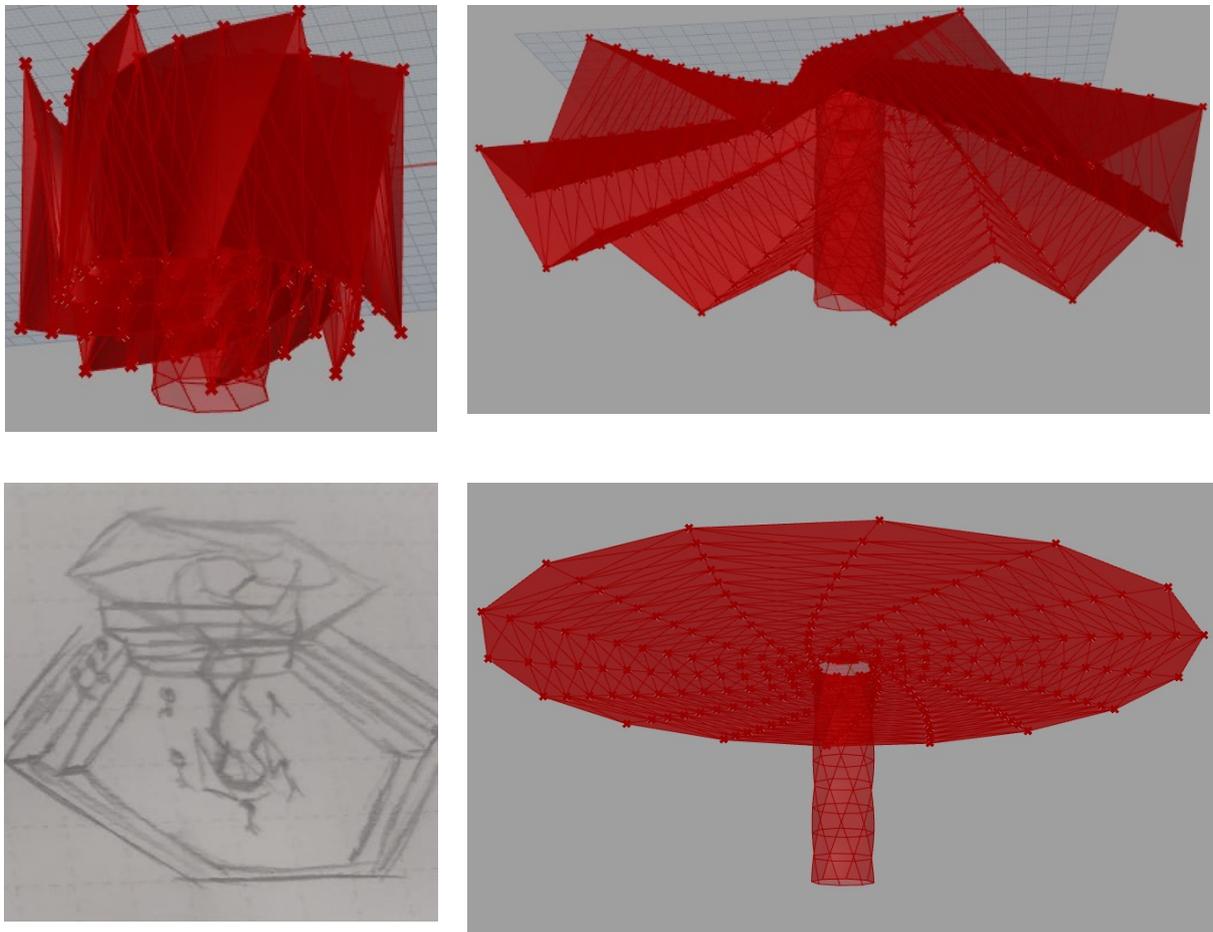


Ilustración 38: Modelo del 2 borrador y modelo. Elaboración propia

En este caso se utiliza una mezcla entre starshade (Toldo) y high tower spring (Eje vertical).

Como en el primer borrador, se realiza una maqueta con papel de la estructura a pequeña escala.

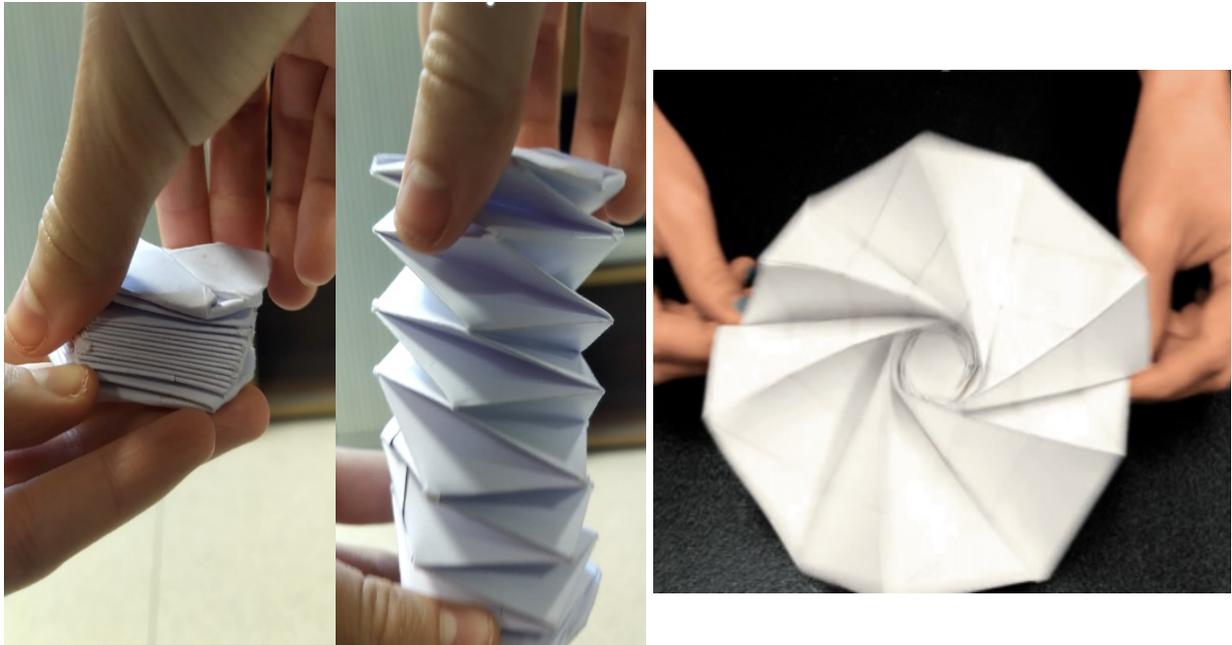


Ilustración 39: Borrador 2. Elaboración propia

Además, también se crea un modelo con Grasshopper, el cual se muestra a continuación.

TOLDO: Union de curvas y creacion de mallado

Se unen las curvas entre sí creando un mallado que define el total de la superficie del toldo.

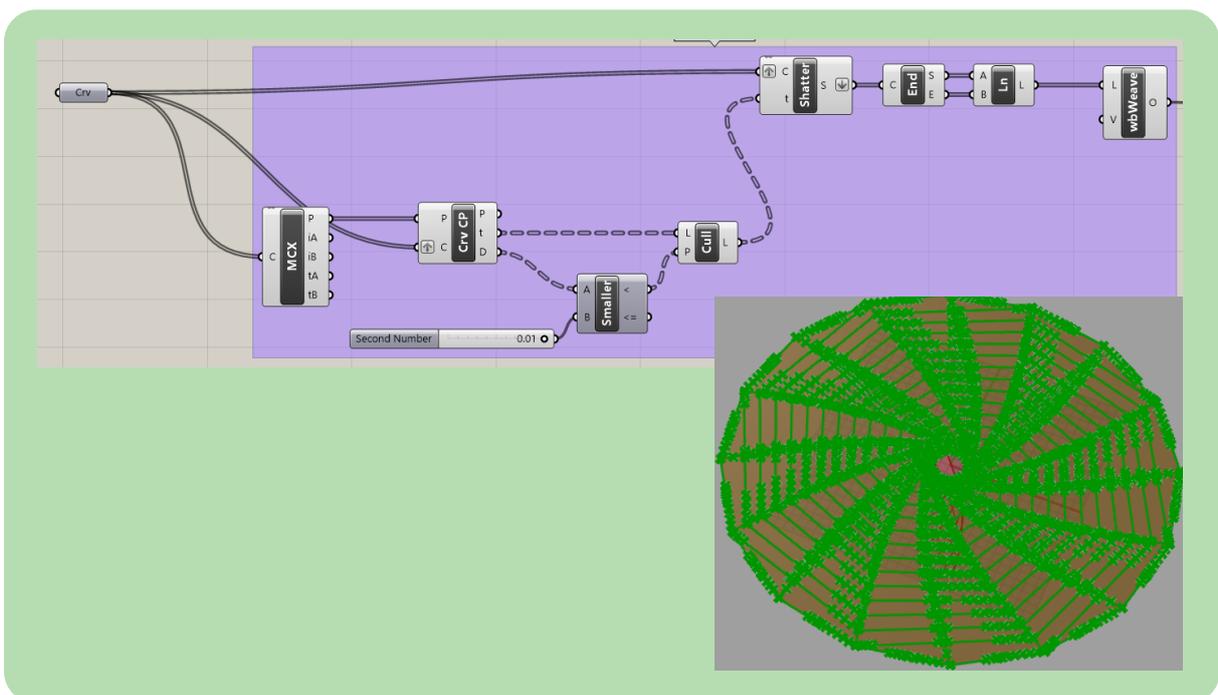


Ilustración 40: Toldo. Paso 1. Elaboración propia

TOLDO: Union de curvas entrelazadas

Se van creando líneas entrelazadas en la malla para posteriormente generar las dobleces por esas zonas y utilizar algunas como montes o valles.

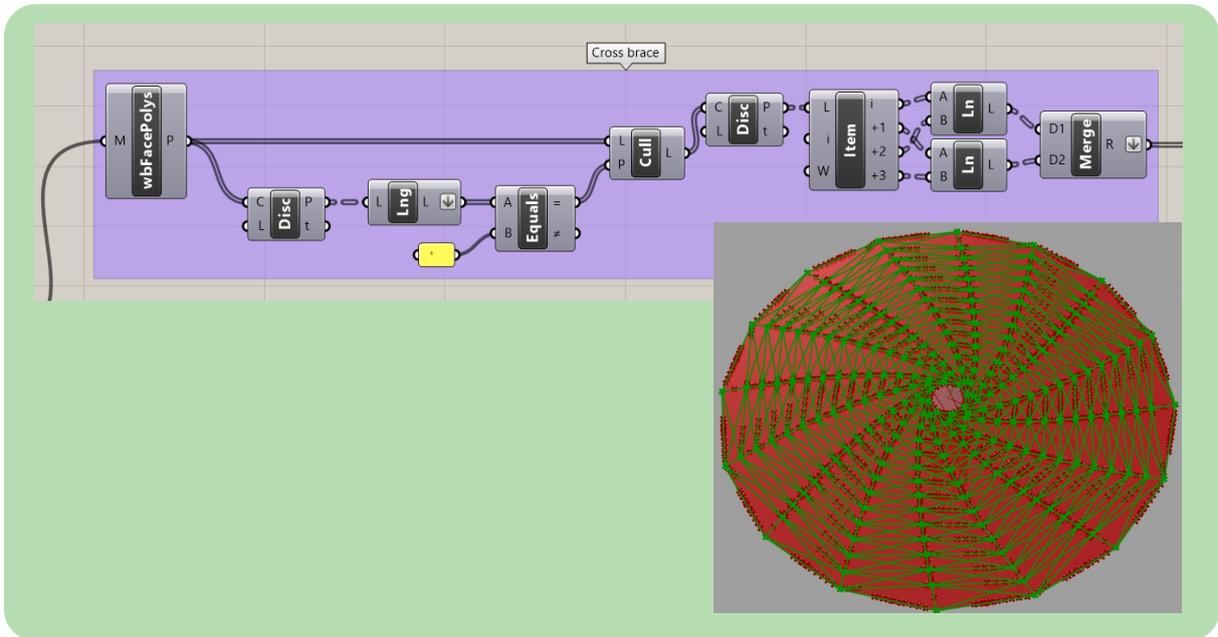


Ilustración 41: Toldo. Paso 2. Elaboración propia

TOLDO: Selección de montañas y valles

Se genera una selección de las montañas o valles para hacer el doblado convexo o concavo.

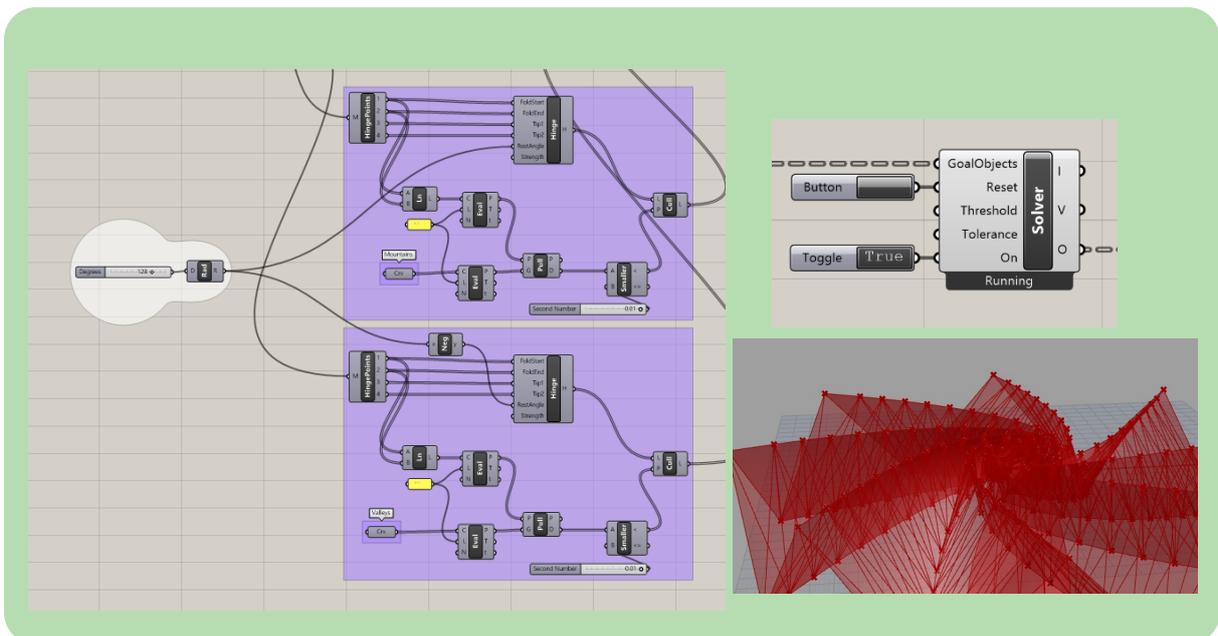


Ilustración 42: Toldo. Paso 3. Elaboración propia

TOLDO: Eje vertical

Se genera un eje vertical del poste mediante entrelazado de curvas y generación de superficie con loft.

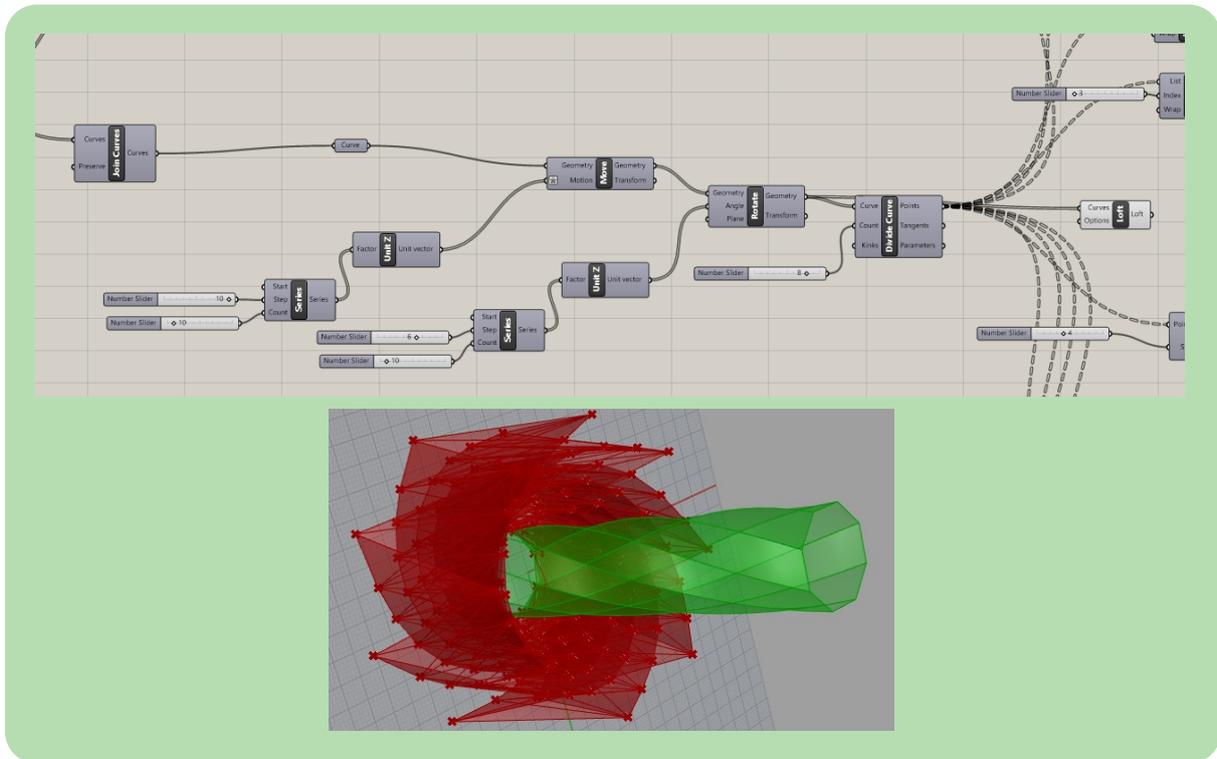


Ilustración 43: Toldo. Paso 4. Elaboración propia

4.3.3. Tercer borrador

En este tercer y último anteproyecto se presenta una estructura diferente a las dos anteriores. En este caso, se le aplica una serie de estrellas como en la imagen superior sobre una superficie. Estas estrellas tienen una función de moverse al son de la música, es decir, cuando la música suena, estas estrellas se expanden y se contraen hacia adentro y hacia afuera, creando un efecto visual muy atractivo. Además, el escenario consiste en un polígono rodeado por gradas.

Esta opción es interesante a nivel visual y sonoro, ya que permite moverse para aumentar o disminuir la reverberación. Estas estrellas tienen la capacidad de plegarse o desplegarse según las necesidades de los usuarios.

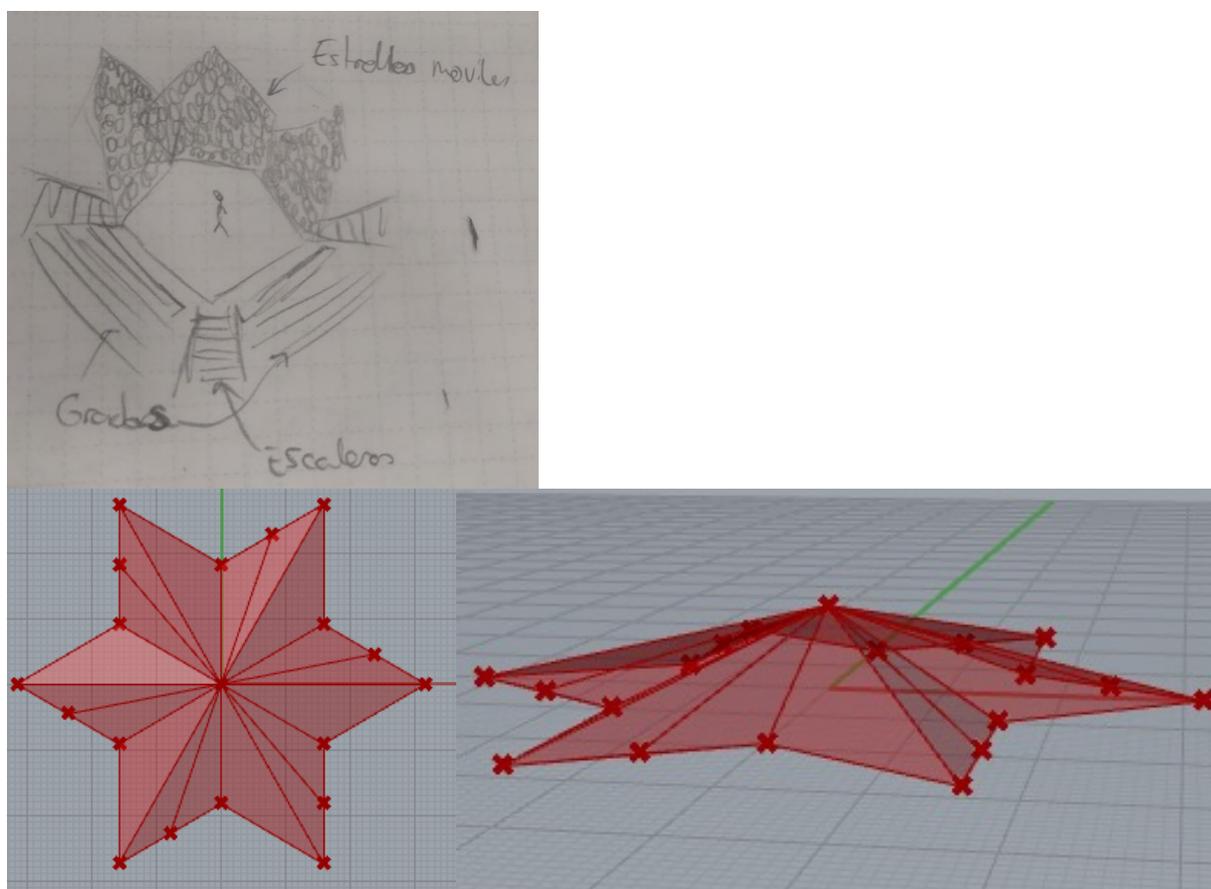


Ilustración 44: Modelo del 3 borrador y modelo. Elaboración propia

Para la realización de este borrador, se utiliza un origami tradicionalmente utilizado en la cultura islámica (mashrabiya). Este patrón se caracteriza por tener una matriz de estrellas.

Además, también se genera un modelo a pequeña escala con papel para visualizar el resultado antes de la creación del modelo 3d. En las imágenes se puede comprobar cómo esta estrella consiste en realizar ciertas dobleces en el papel hasta un punto, en el cual todas las dobleces convergen.

Aunque en esta maqueta se prueba la creación de una estrella de 8 puntas, en el modelo se aplican 6 puntas.



Ilustración 45: Estrella. Elaboración propia

ESTRELLAS: Creacion de líneas de estrella

Creación de estrella individual mediante polígonos, selección de puntos y unión mediante polilinea. Tras crear la forma en 2d, se unen todos los vertices al centro mediante line.

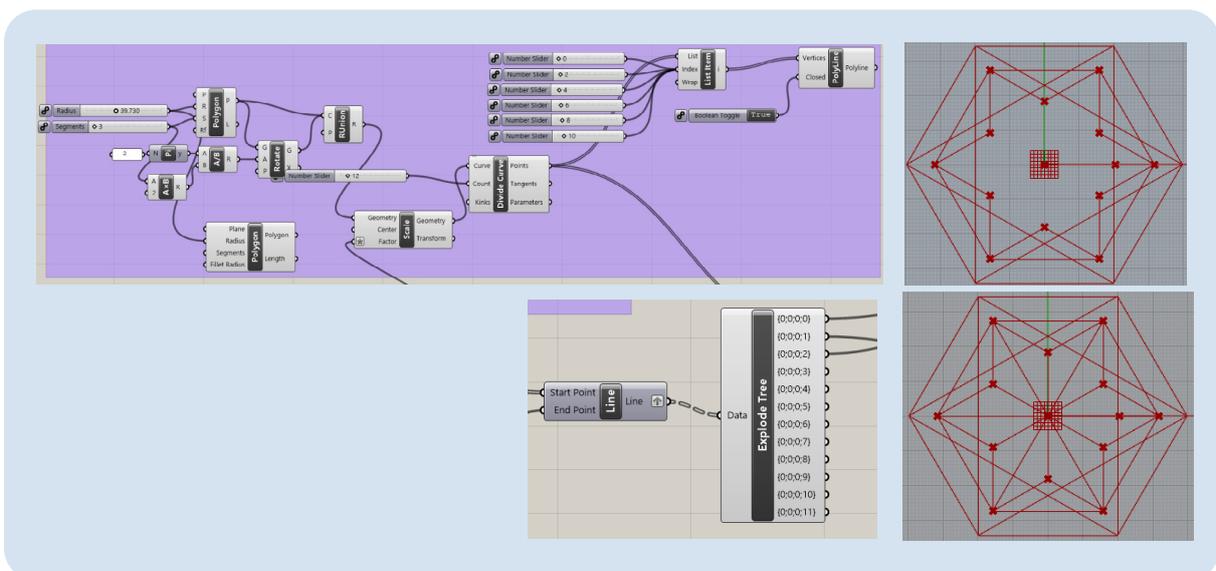


Ilustración 46: Creación de matriz de estrellas: Paso 1. Elaboración propia

ESTRELLAS: Creación de superficies de estrella

Creación de superficies de estrella mediante plugin de Kangaroo. Este plugin se encarga de poder crear la superficie y aportarle el movimiento cuando se mueven los vertices.

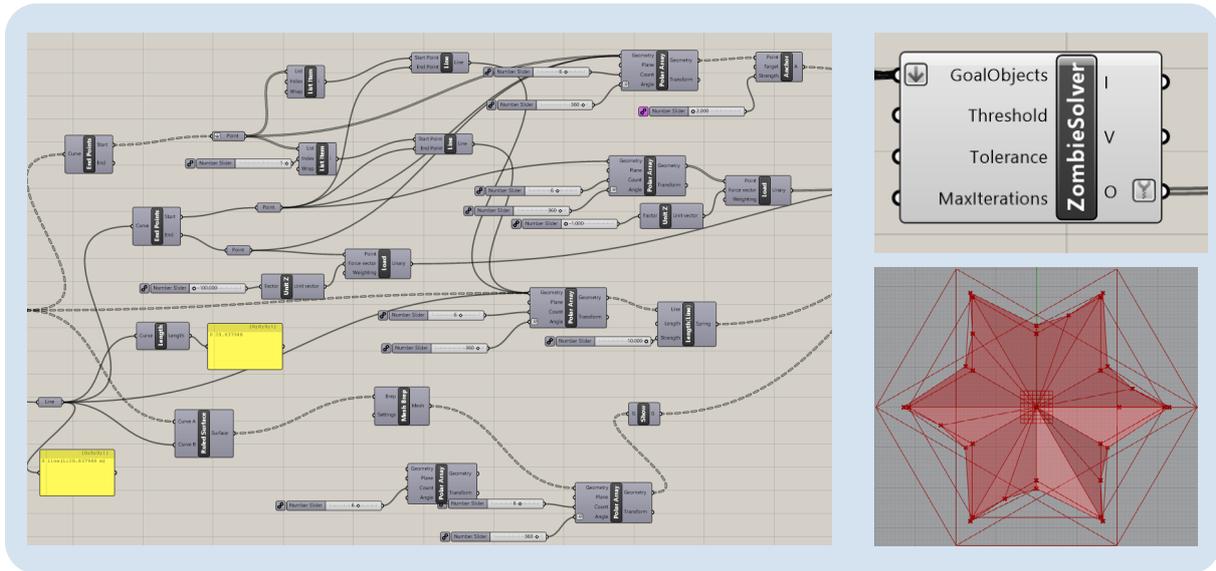


Ilustración 47: Creación de matriz de estrellas: Paso 2. Elaboración propia

4.4. SELECCIÓN DE LA PROPUESTA FINAL

En este apartado se muestra el proceso y desarrollo de la propuesta final.

4.4.1. Modelo 3D

Para comenzar con el modelo, se genera primero las zonas modeladas por Rhinoceros y posteriormente las de Grasshopper. Todas las zonas principales excepto las estrellas y la cúpula son diseñadas mediante Rhinoceros 3d. Los modelos se encuentran en el **Anexo B. Modelo 3D con Grasshopper.**

Para el desarrollo de la estructura en Rhinoceros, se comienza a desarrollar la forma base hexagonal de la estructura, el escenario y las paredes de ambos.

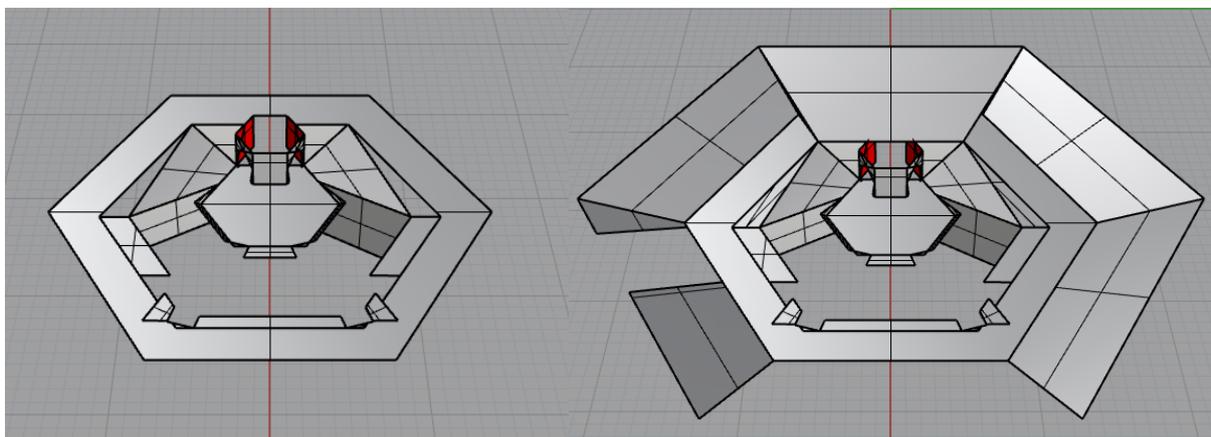


Ilustración 48: Creación de forma base y escenario. Elaboración propia

Posteriormente, se comienza a desarrollar las gradas que rodean al escenario y las escaleras.

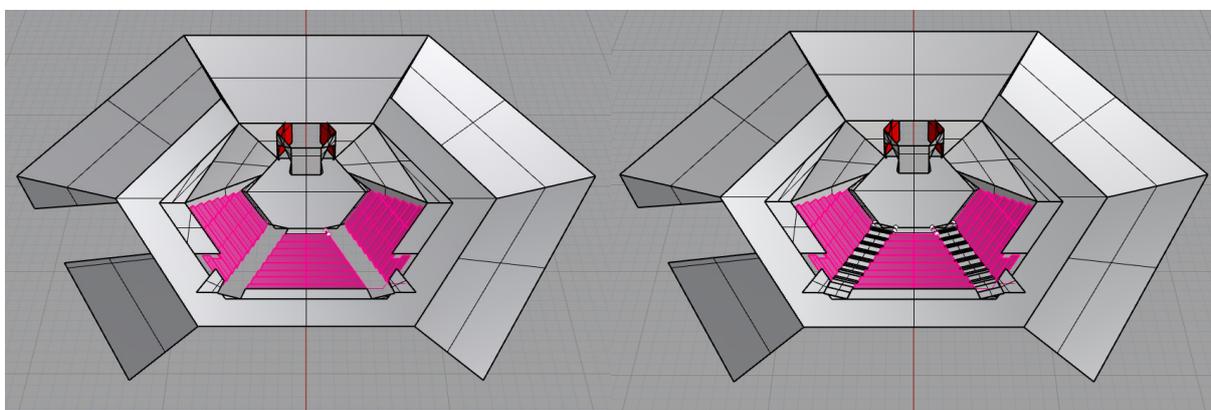


Ilustración 49: Proceso de creación de gradas y escaleras. Elaboración propia

Una vez introducidas las zonas de las gradas, se procede a añadir la zona del bar y los baños, que se encuentran en las zonas laterales del auditorio junto a unas escaleras de salida en cada uno.

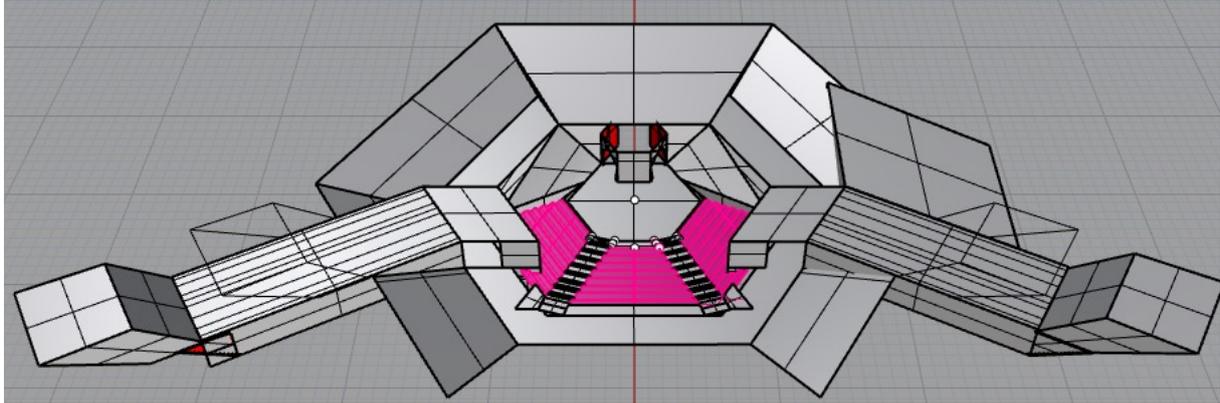


Ilustración 50: Auditorio completo. Elaboración propia

Tras añadir las zonas laterales, se modela la entrada con las escaleras y la pasarela con forma de origami. Esta zona es por donde los asistentes validan su entrada y acceden al recinto.

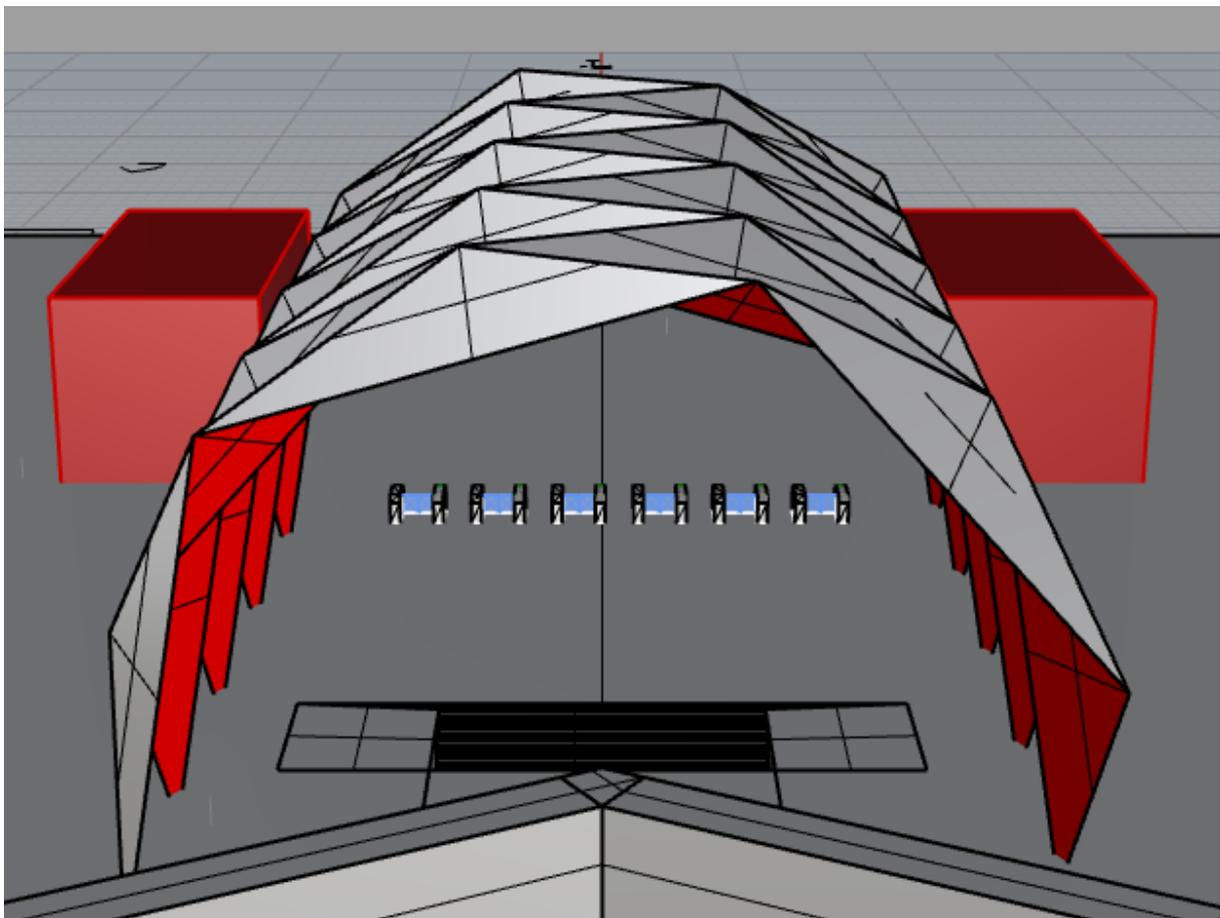


Ilustración 51: Zona de entrada. Elaboración propia

Por último, se diseña la base de la cúpula del auditorio.

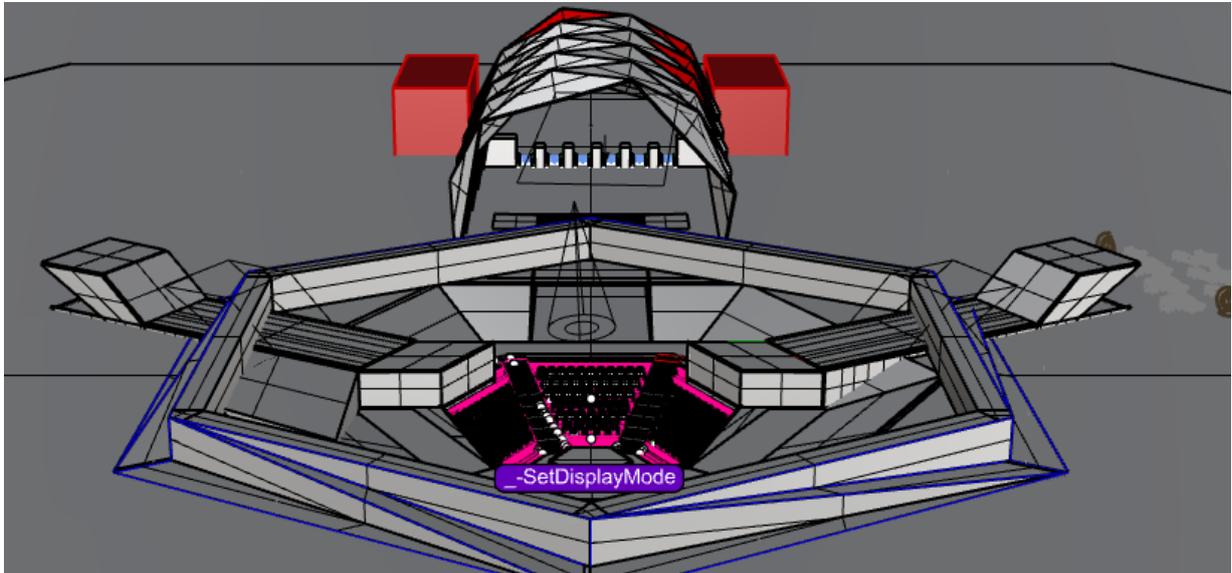


Ilustración 52: Auditorio completo. Elaboración propia

4.4.1.1. Cúpula y estrellas

Una vez se finaliza con las zonas de rinoceros, se procede a diseñar las estructuras de la cúpula y estrellas con grasshopper. A continuación se explica y muestra el código utilizado para la programación de esta cúpula y de las estrellas.

En ambos casos se utiliza el mismo código mostrado en el apartado de la elaboración de alternativas, aunque añadiendo diversos detalles.

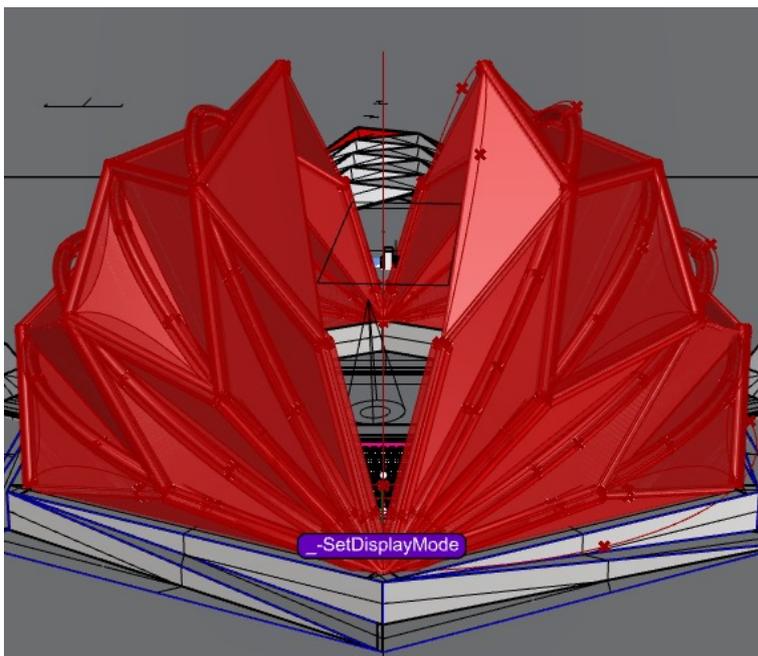


Ilustración 53: Cúpula en Grasshopper. Elaboración propia

CÚPULA: Creación de curva base de la Cúpula

Generación de una curva base que formará parte de la zona superior de la cúpula. Esta curva base es la que le da la forma semiesférica a la cúpula.

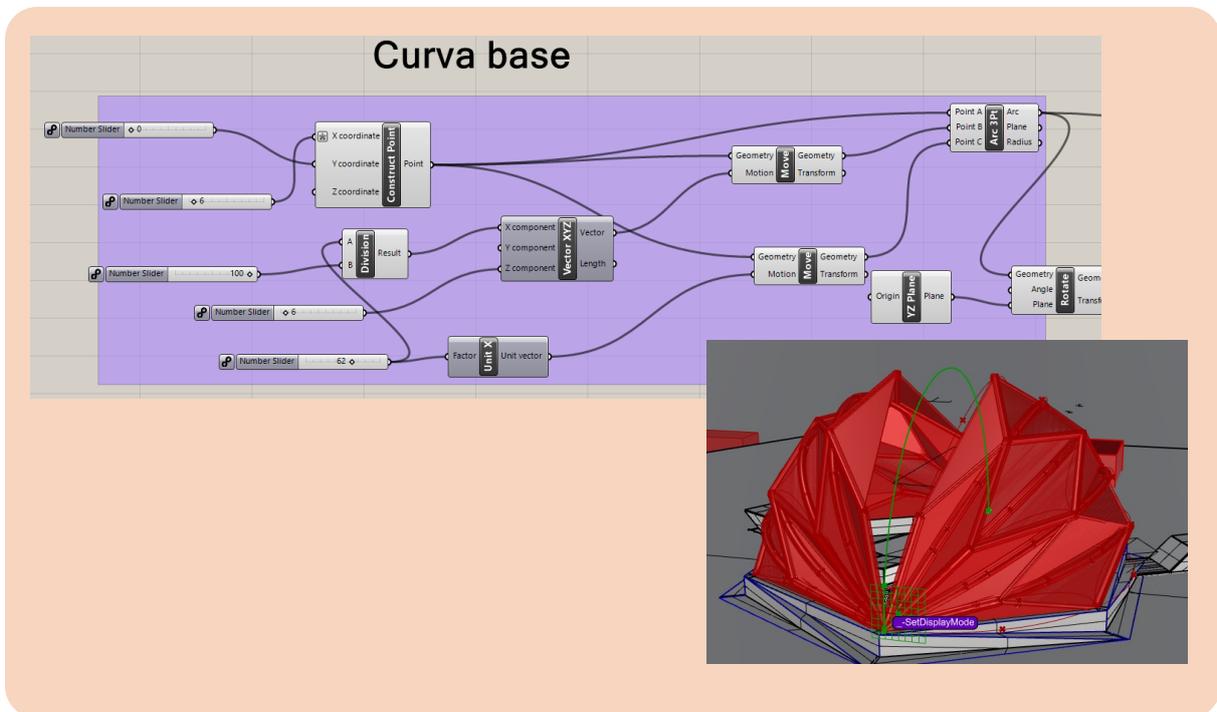


Ilustración 54: Cúpula. Paso 1. Elaboración propia

CÚPULA: Repetición de la curva base

La curva base creada al inicio se repite hasta completar la semiesfera y posteriormente se dividen estas curvas en curvas pares e impares. Para esto se utiliza la función cull pattern.

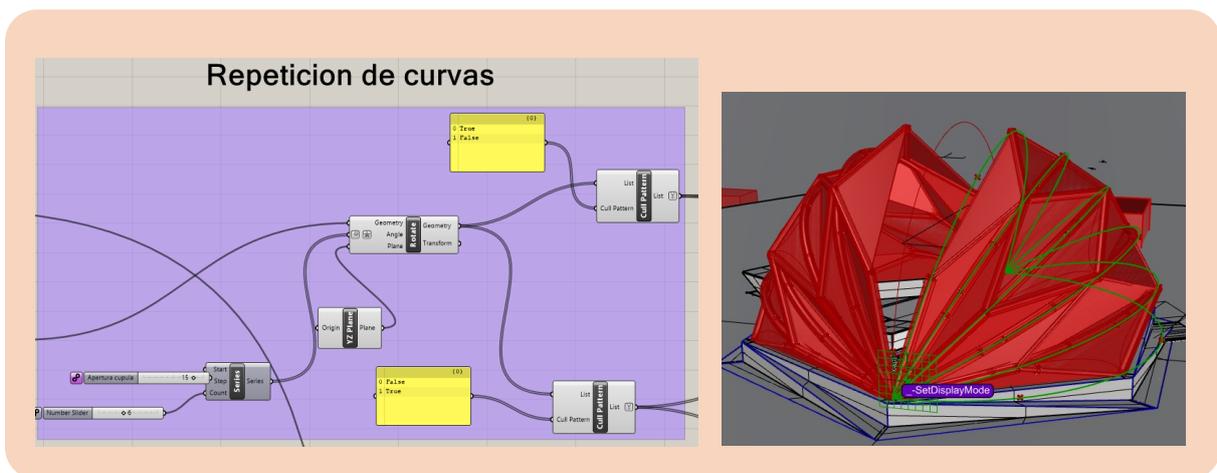


Ilustración 55: Cúpula. Paso 2. Elaboración

CÚPULA: Division de curva de curvas pares e impares

Las curvas previamente creadas se dividen en varios puntos. Para ello, a ambas curvas se les aplica un divide curve.

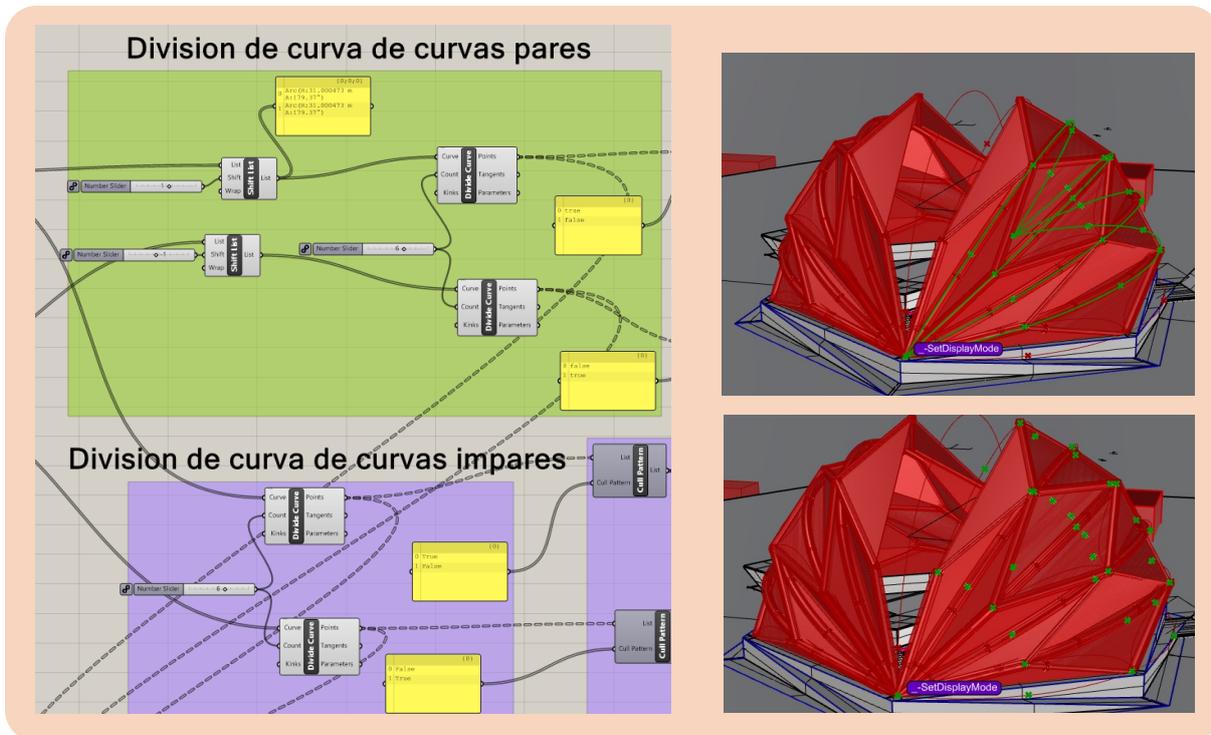


Ilustración 56: Cúpula. Paso 3. Elaboración propia

CÚPULA: Union de puntos pares entre las curvas pares e impares:

Los puntos que anteriormente se han dividido se unen mediante selección de los puntos y union con line. Despues de tener esas lineas se unen con loft para obtener unas superficies.

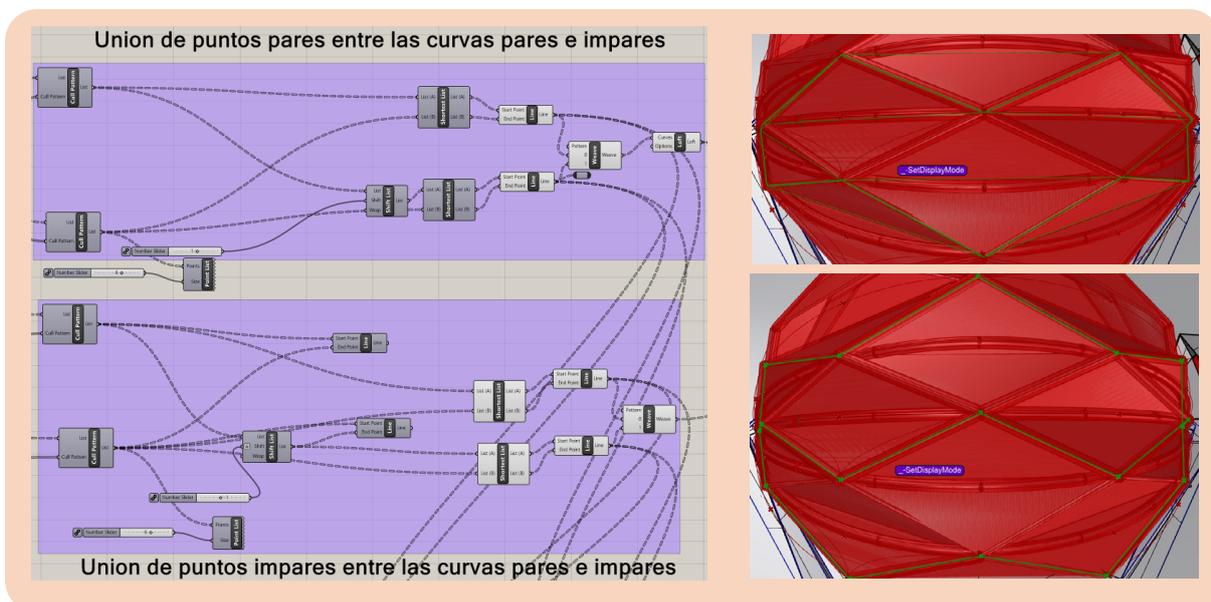


Ilustración 57: Cúpula. Paso 4. Elaboración propia

CÚPULA: Aplicación de espesor, material y sincronización

Una vez tenemos la geometría, se le aplica espesor, material y se sincroniza con Rhinoceros.

Aplicación de espesor (Consumo muchos recursos)

Aplicación del material y sincronización

Ilustración 58: Cúpula. Paso 5. Elaboración propia

CÚPULA: Generación de tuberías

Además de las superficies, se le añaden tuberías en las líneas mediante Multipipe para darle un aspecto más realista.

Selección de líneas de la cúpula

Tuberías

Ilustración 59: Cúpula. Paso 6. Elaboración propia

ESTRELLAS: Creacion de lineas de estrella

Creación de estrella individual mediante polígonos, selección de puntos y unión mediante polilinea. Tras crear la forma en 2d, se unen todos los vertices al centro mediante line.

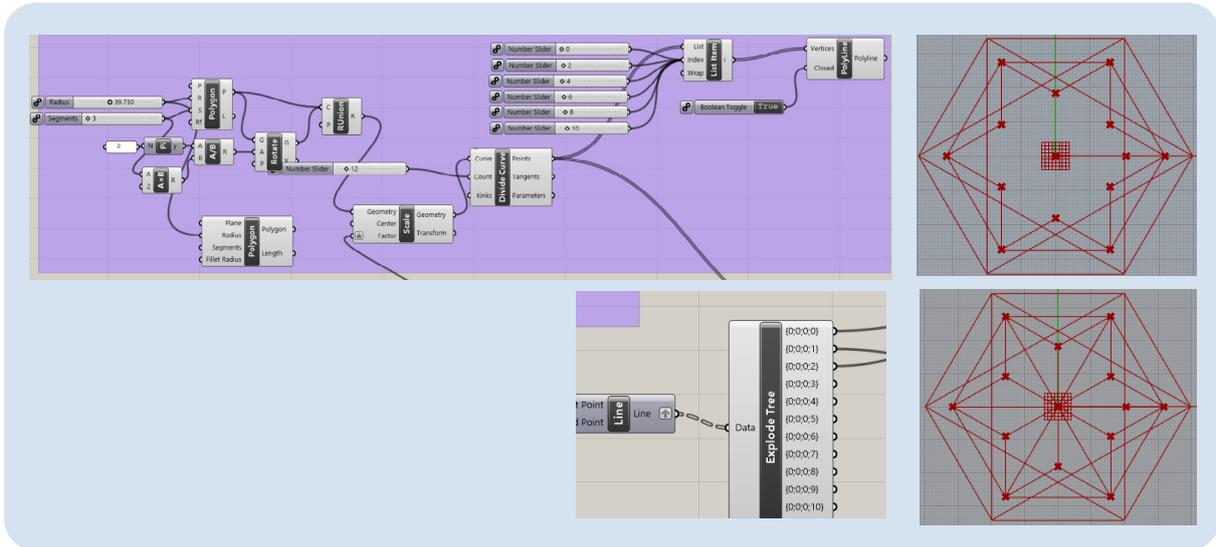


Ilustración 60: Creación de matriz de estrellas: Paso 1. Elaboración propia

ESTRELLAS: Creacion de superficies de estrella

Creación de superficies de estrella mediante plugin de Kangaroo. Este plugin se encarga de poder crear la superficie y aportarle el movimiento cuando se mueven los vertices.

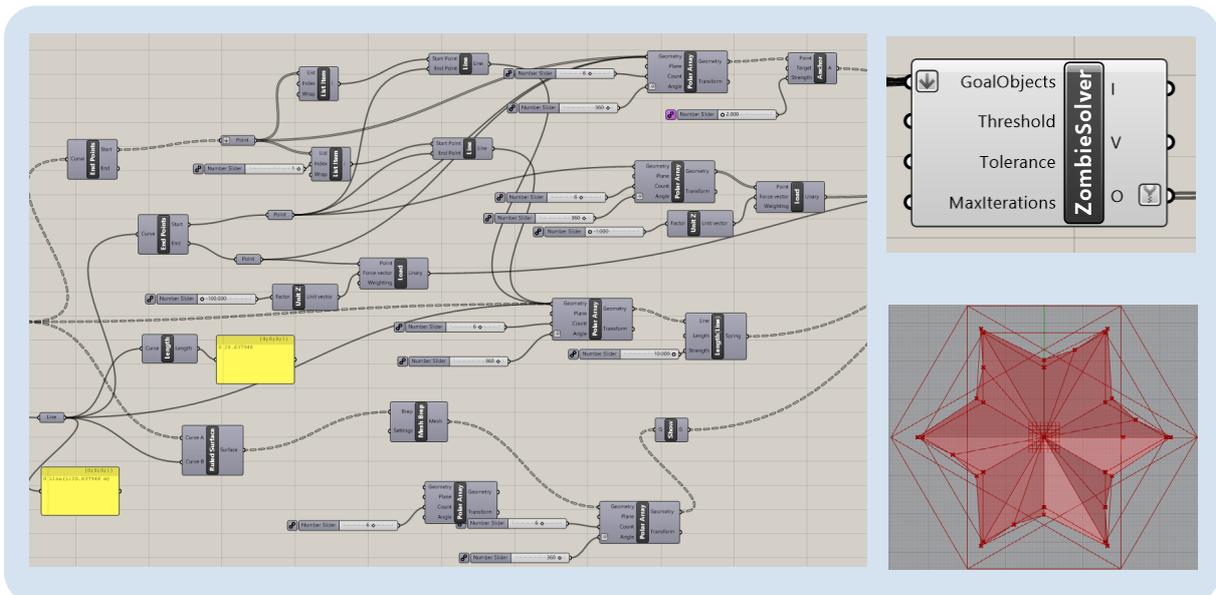


Ilustración 61: Creación de matriz de estrellas: Paso 2. Elaboración propia

ESTRELLAS: Creacion de matriz de estrellas en superficie

Colocacion de estrellas en la superficie mediante la seleccion de la estrella, separacion de la superficie y orientacion de las estrellas en esa superficie.

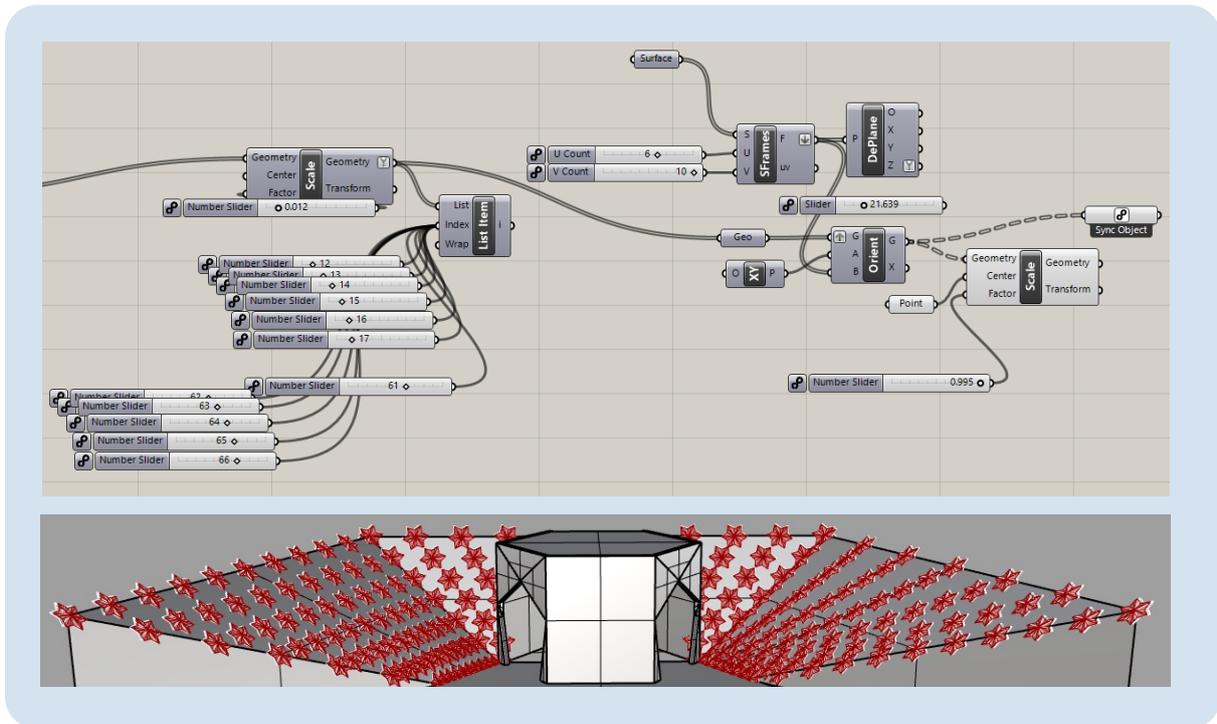


Ilustración 62: Creación de matriz de estrellas: Paso 3. Elaboración propia

También se muestra un listado de los plugin utilizados en el documento de Grasshopper para poder instalarlos en caso de querer visualizarlos:

- **Fologram**
- **Kangaroo2**
- **Pufferfish**

4.4.2. Aplicación a la realidad aumentada

Por ultimo, una vez se aplican los materiales al 3d mediante Vray, se escanea el código QR de Fologram para poder ver el modelo en un dispositivo móvil.

El video de presentación de realidad aumentada se encuentra adjunto en el **Anexo C. Video RA.**

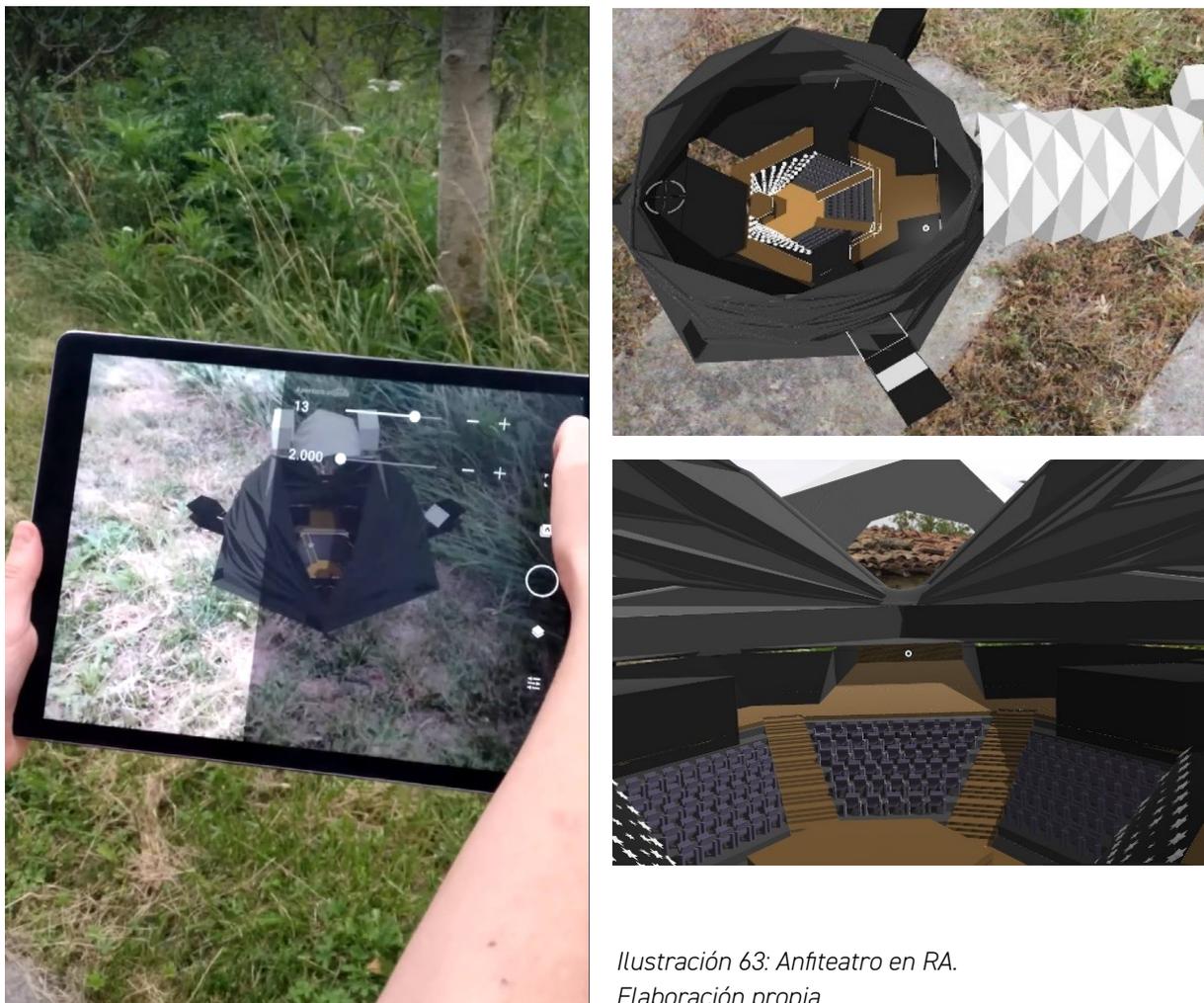
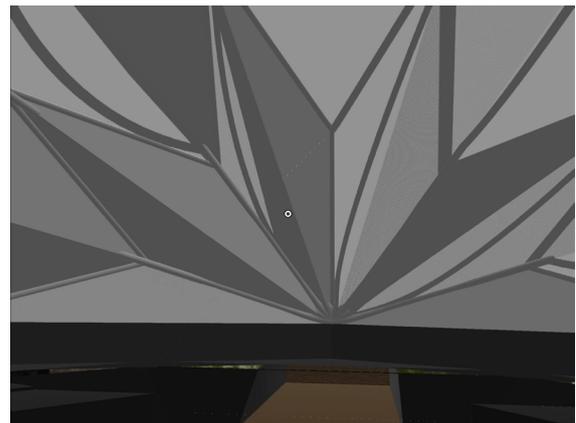
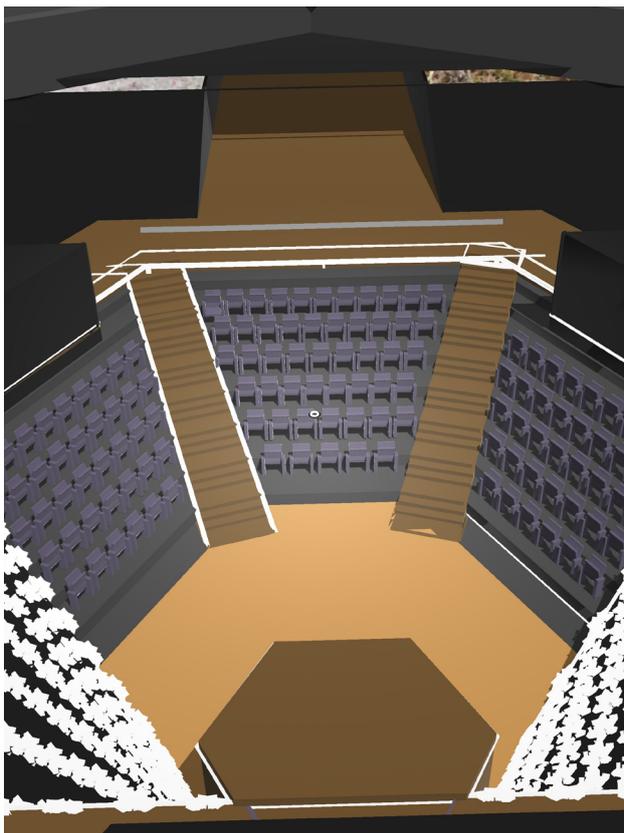


Ilustración 63: Anfiteatro en RA.
Elaboración propia



4.4.2.1. Metodología de visualización del auditorio

En este apartado, se explica cómo visualizar e interactuar con el auditorio en realidad aumentada mediante la herramienta Fologram.

Para acceder al código QR, se debe de ejecutar el comando **"Fologram"** en Rhinoceros y se conecta al dispositivo deseado mediante el QR.

Una vez escaneado este código con la aplicación de fologram del dispositivo móvil, se posiciona el modelo en el lugar deseado. Para ello, se ha de escanear la zona con la cámara y en el momento que esta matriz hexagonal aparezca, se puede colocar el modelo.

Al clicar en cualquier zona donde se encuentre este mallado, se puede colocar el modelo en ese lugar concreto.

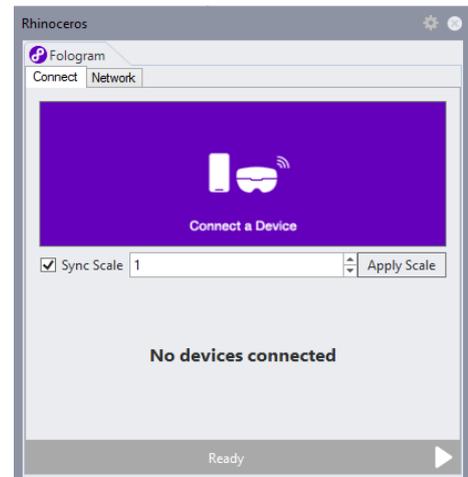


Ilustración 64: Comando Fologram.
Fologram

En este punto, se podrá visualizar el modelo en realidad aumentada rotando y moviendo el dispositivo en cualquiera de los 6 grados de libertad que ofrece esta herramienta.

Este programa además de poder visualizar el modelo en realidad aumentada permite sincronizar la herramienta Grasshopper para poder interactuar con el modelo.

Para poder interactuar con el modelo en tiempo real se ha de crear una sincronización entre el dispositivo y Grasshopper.

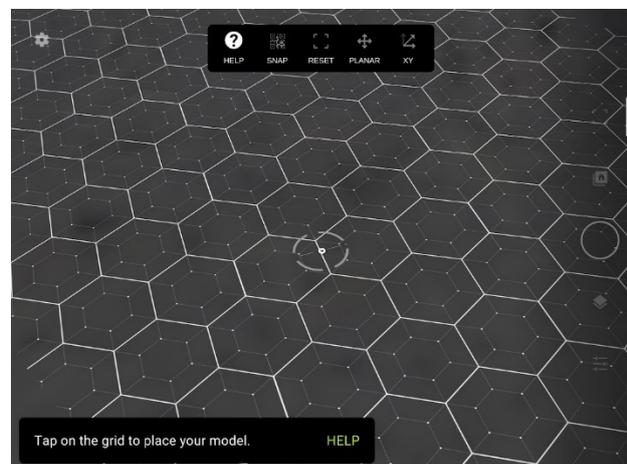


Ilustración 65: Mallado. Fologram.

A continuación, se muestran una serie de esquemas donde se presentan los pasos a seguir para realizar esta sincronización:

REALIDAD AUMENTADA: Sincronización con Grasshopper

Para sincronizar Grasshopper con el dispositivo se utiliza la función sincronizar parámetros, tal y como se muestra en la imagen a continuación. Esta función se conecta posteriormente a los sliders que quieren ser controlados (Un máximo de 3 en la versión gratuita).

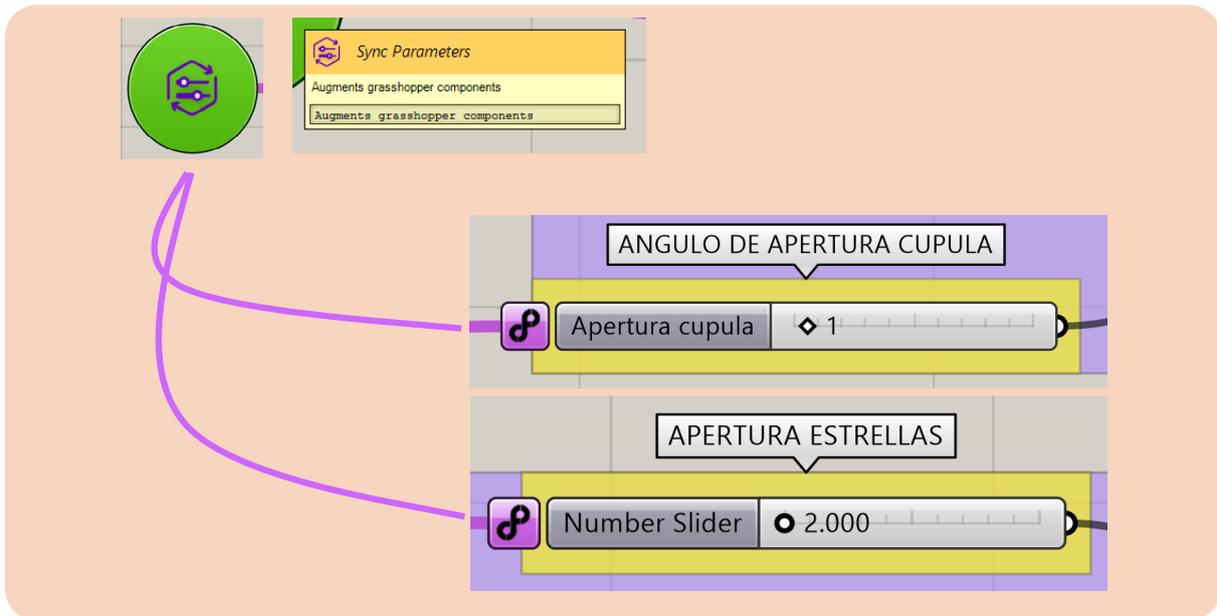


Ilustración 66: Sincronización con Grasshopper. Elaboración propia

REALIDAD AUMENTADA: Apertura o cierre de cúpula

La apertura o cierre de cúpula se puede controlar con el slider apertura cúpula desde la sección de parámetros de fologram.

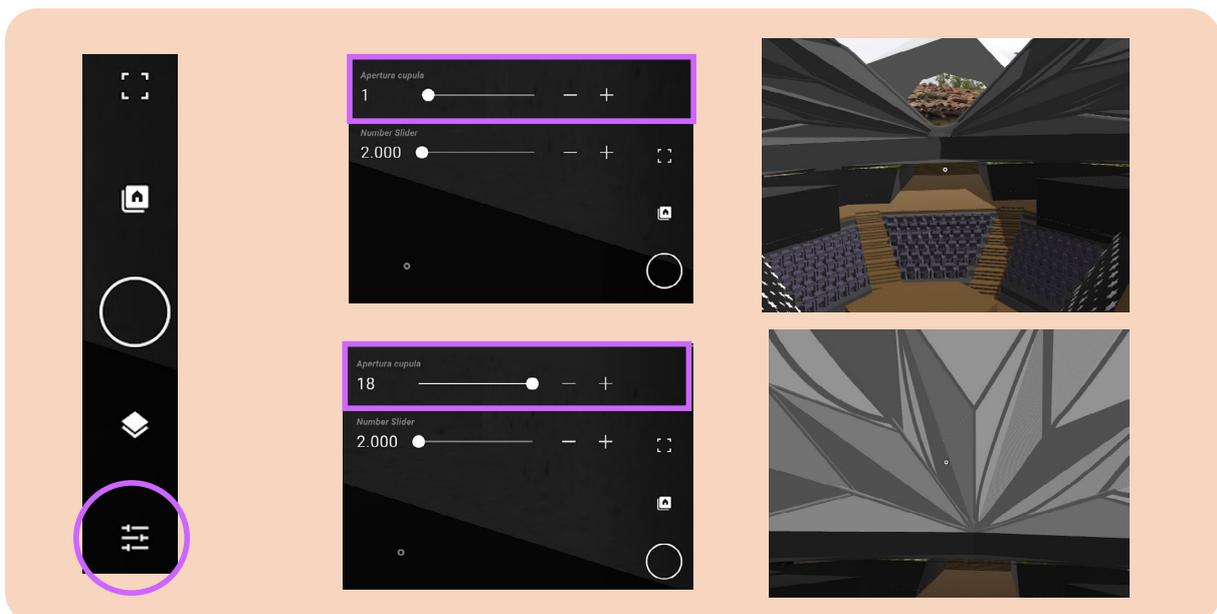


Ilustración 67: Apertura o cierre de cúpula. Elaboración propia

REALIDAD AUMENTADA: Apertura o cierre de estrellas

La apertura o cierre de estrellas se puede controlar con el slider apertura estrellas desde la sección de parámetros de fologram. Se puede observar como cuando se abren se vuelven planas y cuando se cierran se doblan.

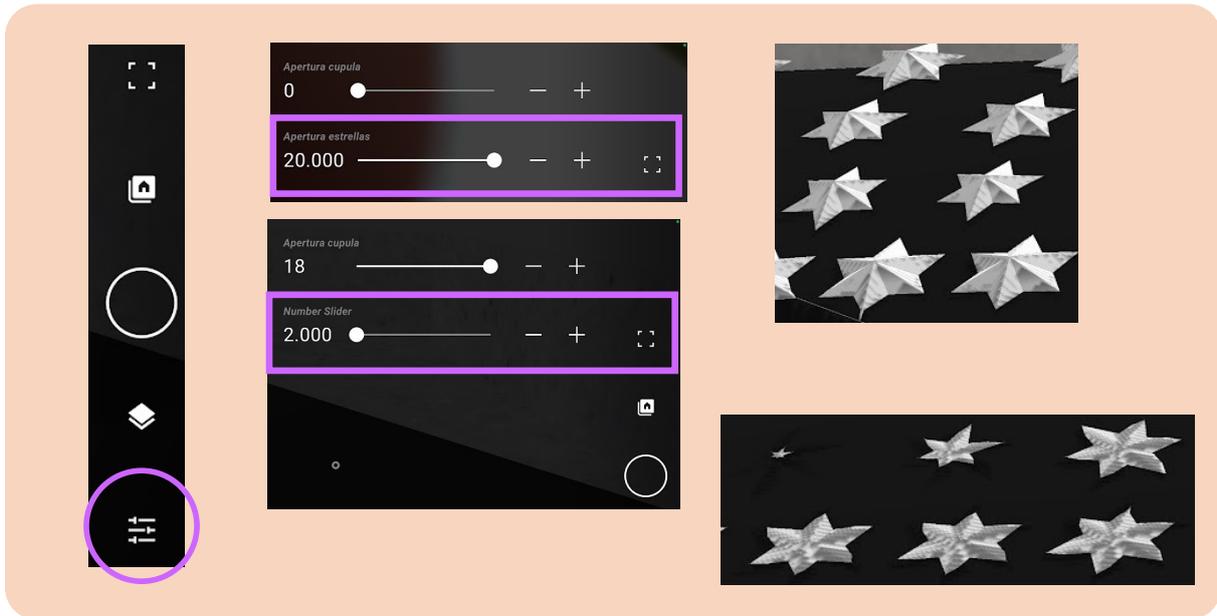


Ilustración 68: Apertura o cierre de estrellas. Elaboración propia

4.5. DESARROLLO DE ESTRUCTURA

Una vez presentados los anteproyectos, se decide seleccionar el proyecto final a desarrollar. En este caso, se aplica una mezcla entre estos 3 anteriores. En este caso, se mantiene la forma base hexagonal y se le añade la cupula y las estrellas.



Ilustración 69: Auditorio final. Elaboración propia

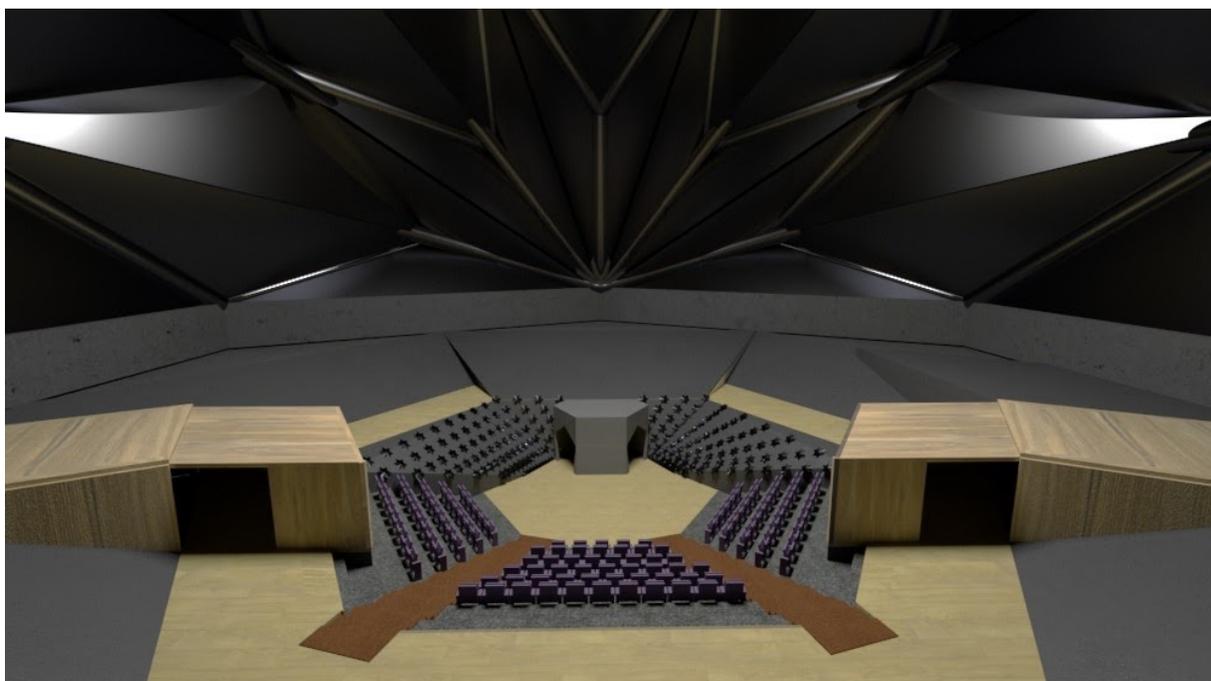


Ilustración 70: Auditorio visto desde el interior. Elaboración propia

4.5.1. Partes principales del auditorio

A continuación, se muestra el desarrollo del proyecto. Para comenzar, se explican las zonas en las que se compone el auditorio.

Este auditorio se compone de 3 zonas principales (También se han diseñado una zona para el bar y baños, aunque al no formar parte principal del auditorio, no se han desarrollado):

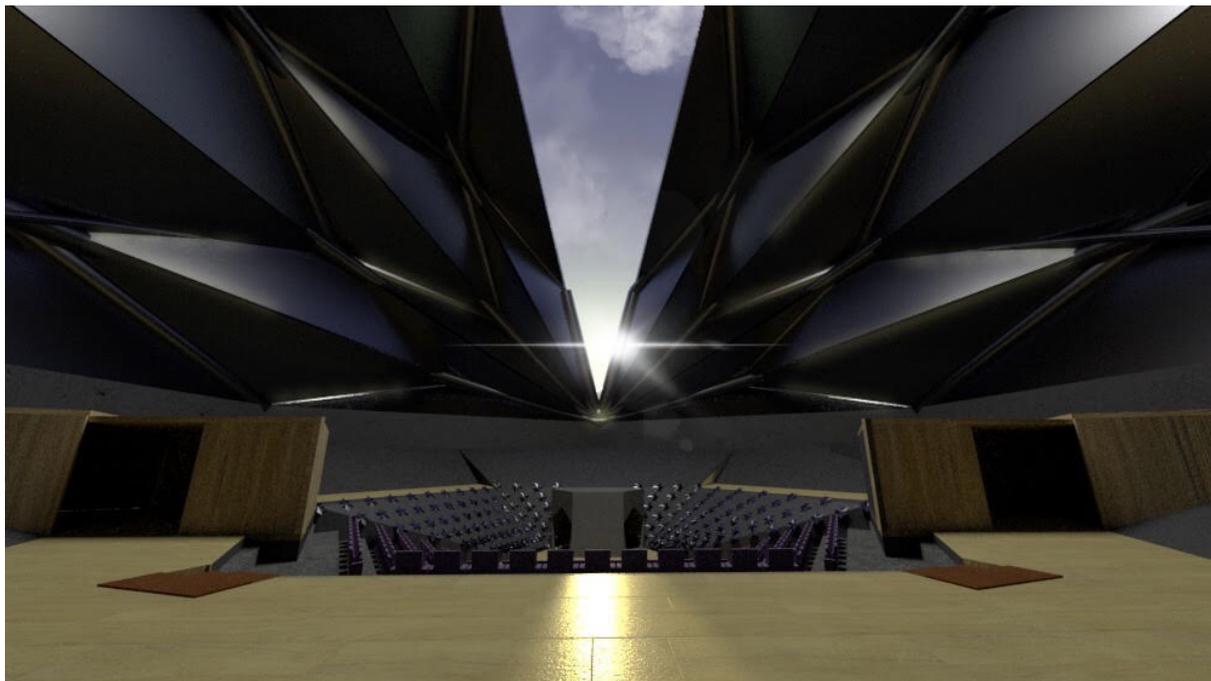


Ilustración 71: Render del auditorio. Elaboración propia

1. Zona del auditorio:

La zona del auditorio es la zona principal del auditorio, es decir, el lugar donde se imparten las charlas o conciertos y donde el público toma lugar para observar el evento.

Esta zona está dividida por dos partes: el escenario y las gradas.

• Escenario

La zona del escenario es semi-hexagonal, al igual que el resto de la estructura. Como se menciona en anteriores apartados, esta forma permite que independientemente la zona en la que se ubique el usuario pueda disfrutar del evento con una calidad equitativa al resto de usuarios. Es el lugar que más importancia cobra de todo el auditorio.

Esta zona es vital tanto a nivel sonoro como de iluminación, para conseguir involucrar al usuario en la obra. Además, el escenario se caracteriza por contener una serie de estrellas interactivas colocadas en la pared diseñadas a partir del origami.

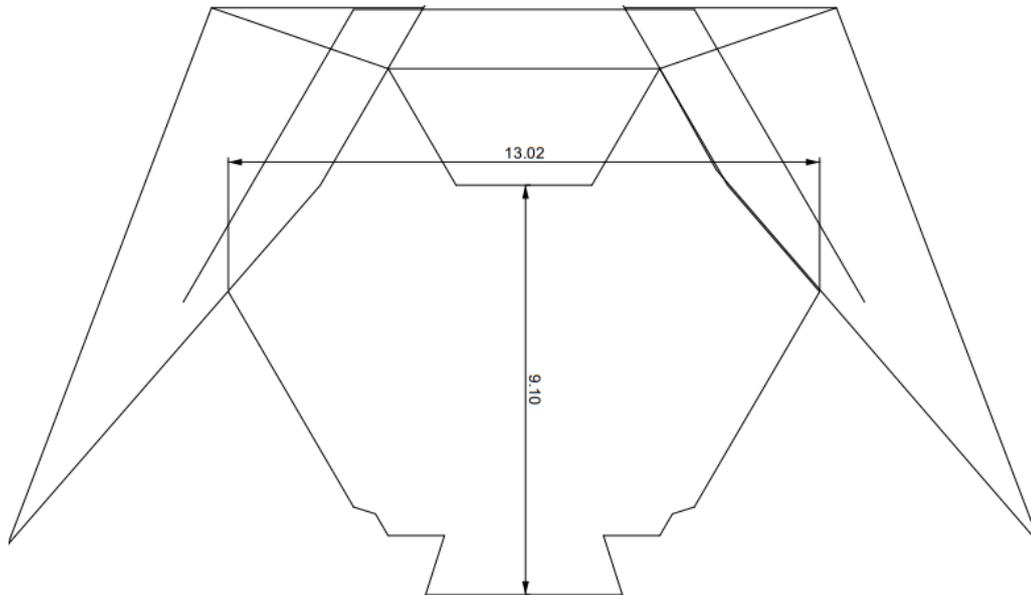
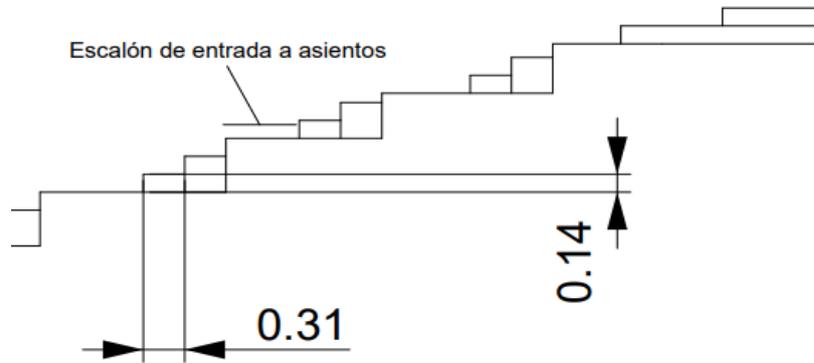


Ilustración 72: Plano de escenario del auditorio. Elaboración propia



Ilustración 73: Renderizado de las gradas. Elaboración propia

• **Gradas**



La zona de las gradas también se caracteriza por estar diseñada con forma hexagonal. Esta zona está dividida en 3 partes: Zona izquierda, Zona centro y Zona derecha.

La zona derecha e izquierda son simétricas, por lo que las dos contienen el mismo número de personas. En cambio, la zona centro es ligeramente más amplia.

Para acceder a las gradas, se deben tomar unas escaleras que se encuentran a los laterales de las gradas centro.

Estas escaleras están diseñadas según la formula François Blondet. Para que la escalera sea cómoda para uso publico, se debe de conseguir que la suma entre dos contrahuellas y una huella sea entre 54 y 70 cm. En el caso de la contrahuella debe estar comprendida entre 13 y 18.5 cm y el mínimo de huella debe ser de un mínimo de 28 cm.

En nuestro caso:

Contrahuella: 0.14 cm

Huella: 0.31 cm

Por lo tanto:

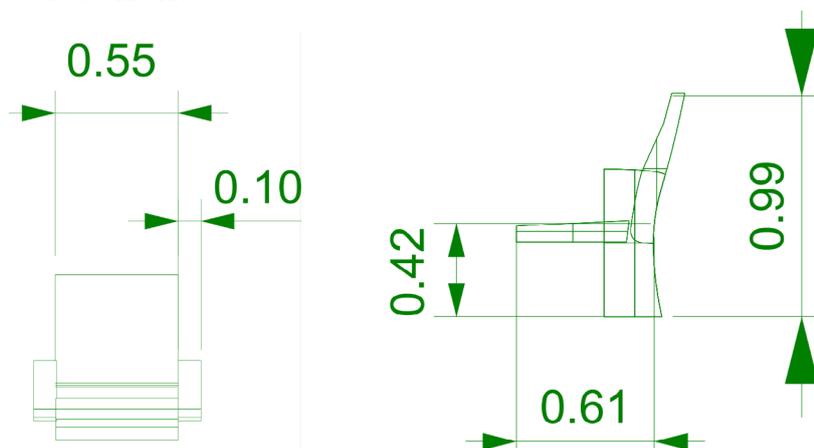


Ilustración 75: Dimensiones de asientos. Elaboración propia

$$X: 0.14 \cdot 2 + 0.31 = 59 \text{ cm}$$

Estas escaleras entrarían en el rango de medidas para conseguir la ergonomía según Francois

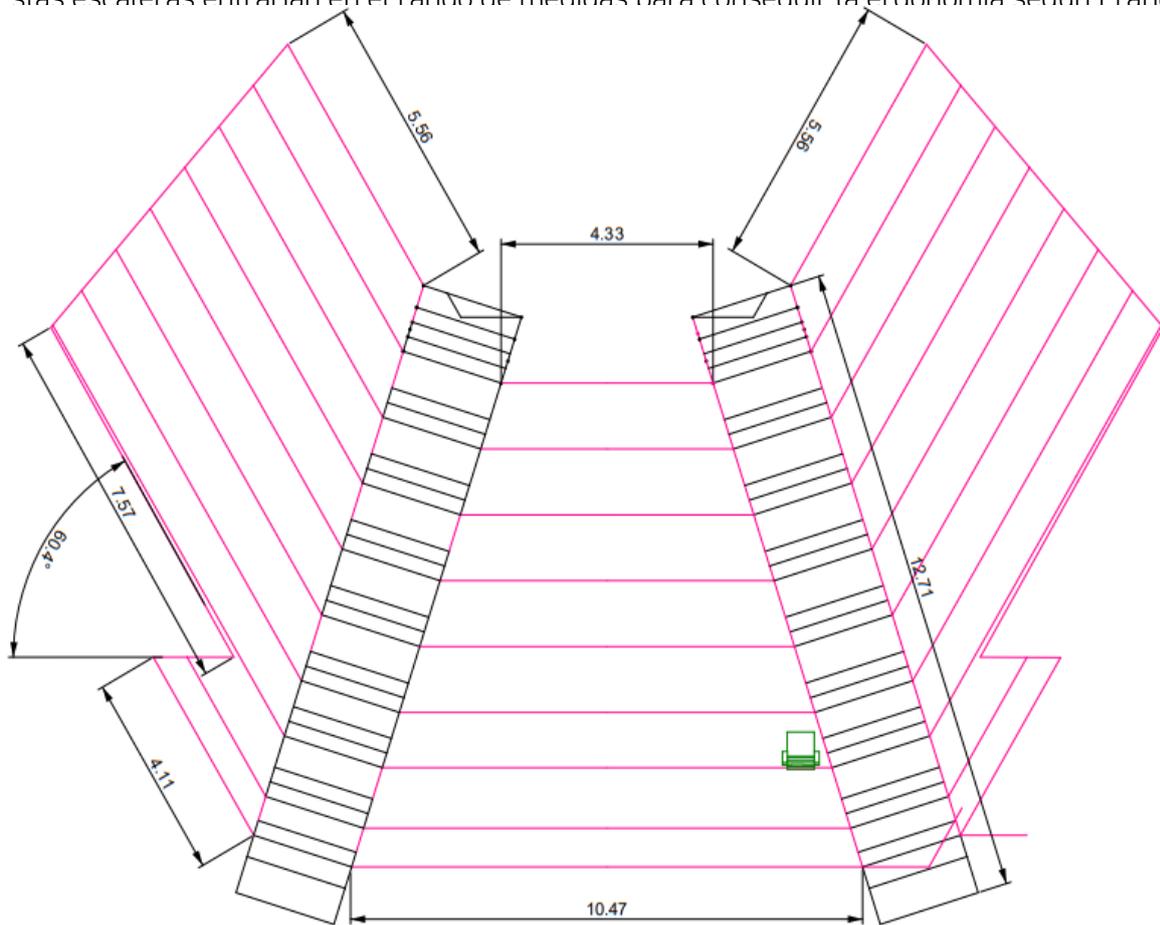


Ilustración 76: Planos de las gradas. Elaboración propia

2. Entrada al auditorio

La entrada al auditorio se hace desde una zona elevada que está compuesta por una estructura de origami con forma de túnel. Antes de esta estructura se pueden encontrar: Información y taquillas, en caso de tener dudas sobre los eventos o problemas con las entradas. Una vez se llega a la estructura de origami, podemos encontrar los tornos. Posteriormente se debe pasar el ticket o la entrada por los tornos para acceder. Continuamos recto y llegamos a unas escaleras que tendremos que descender para llegar a la zona superior de las gradas.

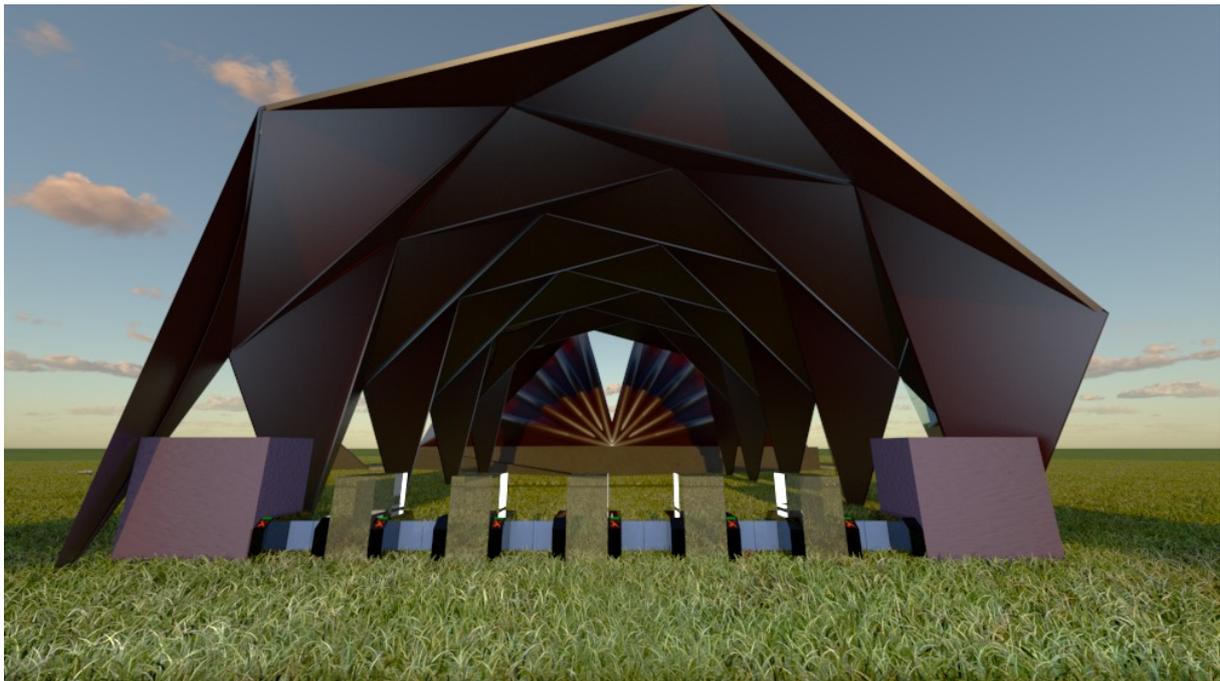


Ilustración 77: Entrada al auditorio. Elaboración propia

Las escaleras de esta zona también están diseñadas con la fórmula de François Blonde.

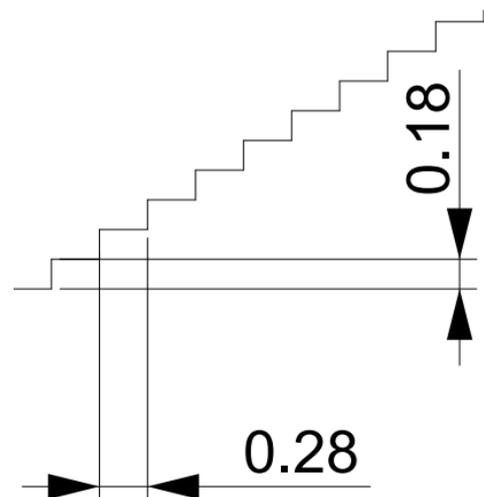
En este caso:

Contrahuella: 0.18 cm

Huella: 0.28 cm

Por lo tanto:

$$X: 0.18 \cdot 2 + 0.28 = 64 \text{ cm}$$



4.5.2. Estructuras de origami aplicadas al auditorio

Como se menciona al comienzo del desarrollo de este proyecto, se han desarrollado 2 estructuras utilizando la forma de origami.

Por una parte, nos encontramos con la **cúpula plegable y desplegable**. Esta cúpula está realizada mediante el patrón de origami Yoshimura y se caracteriza por tener la capacidad de plegarse y desplegarse totalmente.

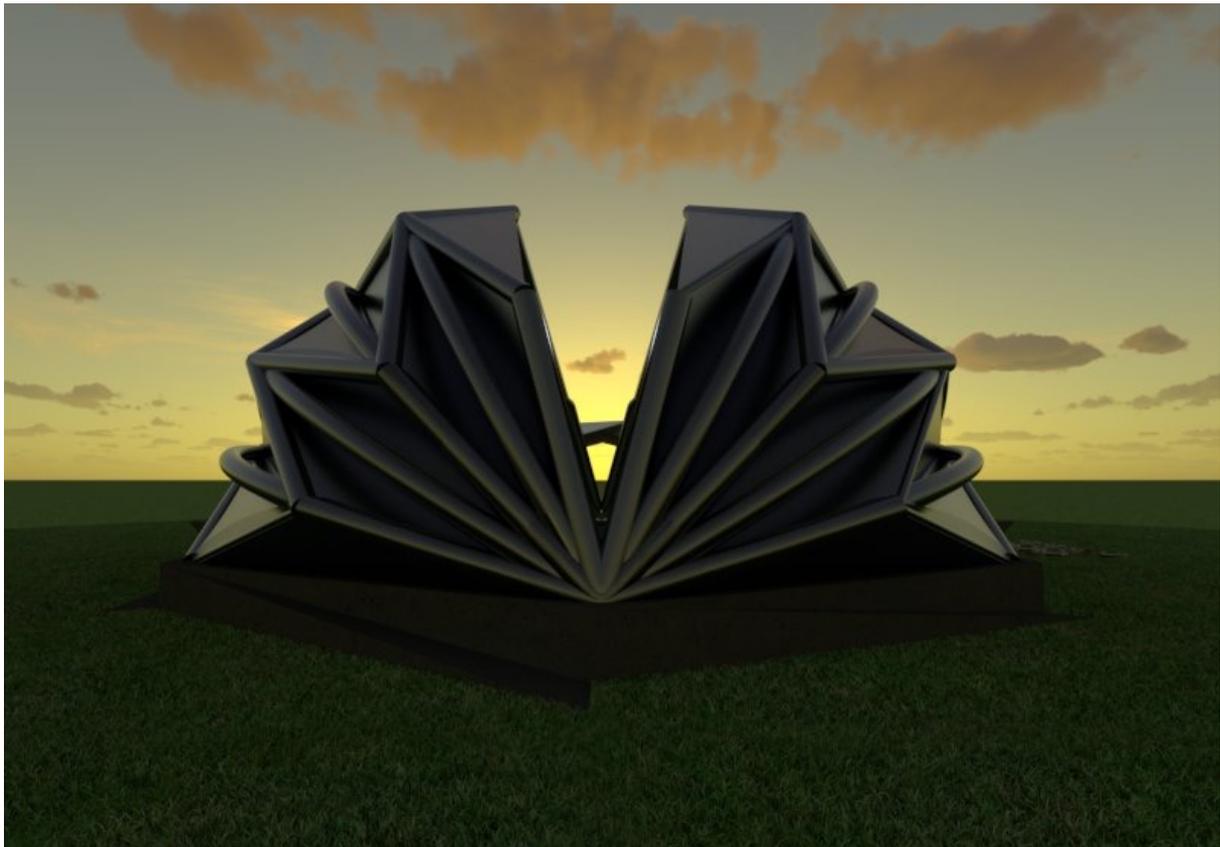


Ilustración 78: Auditorio desde fuera. Elaboración propia

Esta capacidad de plegado tiene una serie de beneficios:

- Permitir tapar la cúpula en caso de que haya mal tiempo o llueva y a su vez cuando hace buen tiempo permitir su apertura.
- Aumentar la reverberación en el espacio.
- Aportar una estética llamativa e interesante.

Esta estructura está realizada mediante la superficie de origami y una serie de vigas y railes contenidos en las aristas de este. Principalmente esta estructura es de gran interés debido a que permite la utilización del espacio en diferentes situaciones o eventos:

- Eventos donde interesa el eco (Ópera, Música clásica...)
- Eventos en los que haya mal tiempo: lluvia, frío...

Además de la cúpula se han añadido unas estrellas en pared trasera del escenario también plegables y desplegadas con un objetivo similar.

Estas estrellas permiten reverberación del sonido hacia la zona delantera del auditorio, es decir hacia las gradas. De esta manera, se consigue que en caso de que la cúpula esté abierta, la intensidad puede aumentar levemente y de esta manera, optimizar el sonido de la sala. Además, estas estrellas son modificables y permiten la variabilidad de posición.

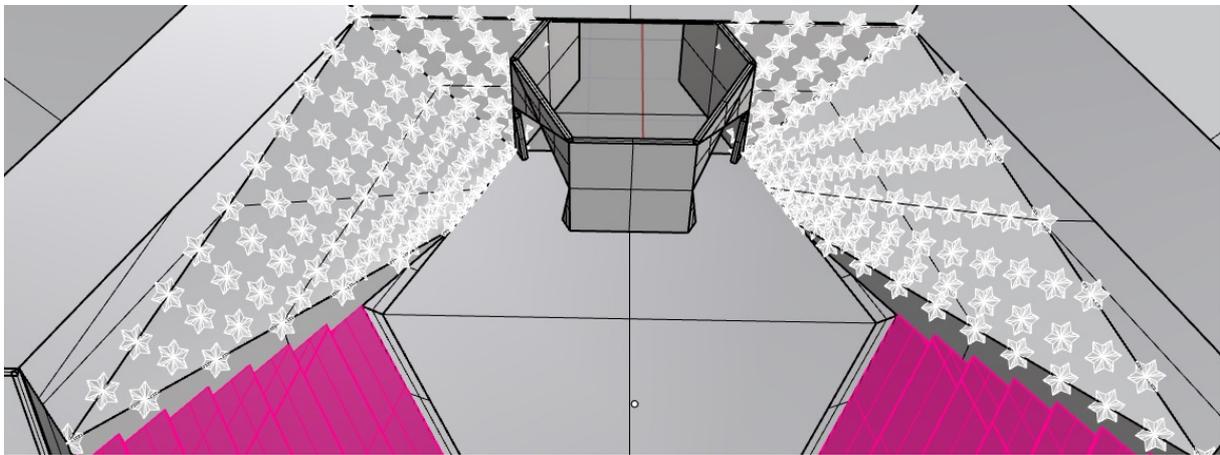


Ilustración 79: Matriz de estrellas en el escenario. Elaboración propia

4.5.3. Iluminación

Uno de los aspectos claves a la hora de diseñar un auditorio es la iluminación, debido a que es uno de los primeros aspectos en lo que se fija el público. Tener un buen diseño de iluminación es indispensable ya que es una de las principales herramientas para que el público pueda observar el evento que se realice en el auditorio.

Para comenzar, se selecciona un punto focal del anfiteatro, que en este caso será el escenario. Este es el lugar donde el público centra su mirada palabras tomar el espectáculo.

Una vez se selecciona el punto focal, se debe considerar la ubicación de las luminarias del escenario. A continuación, se muestra una imagen donde se observa como está colocada la iluminación.

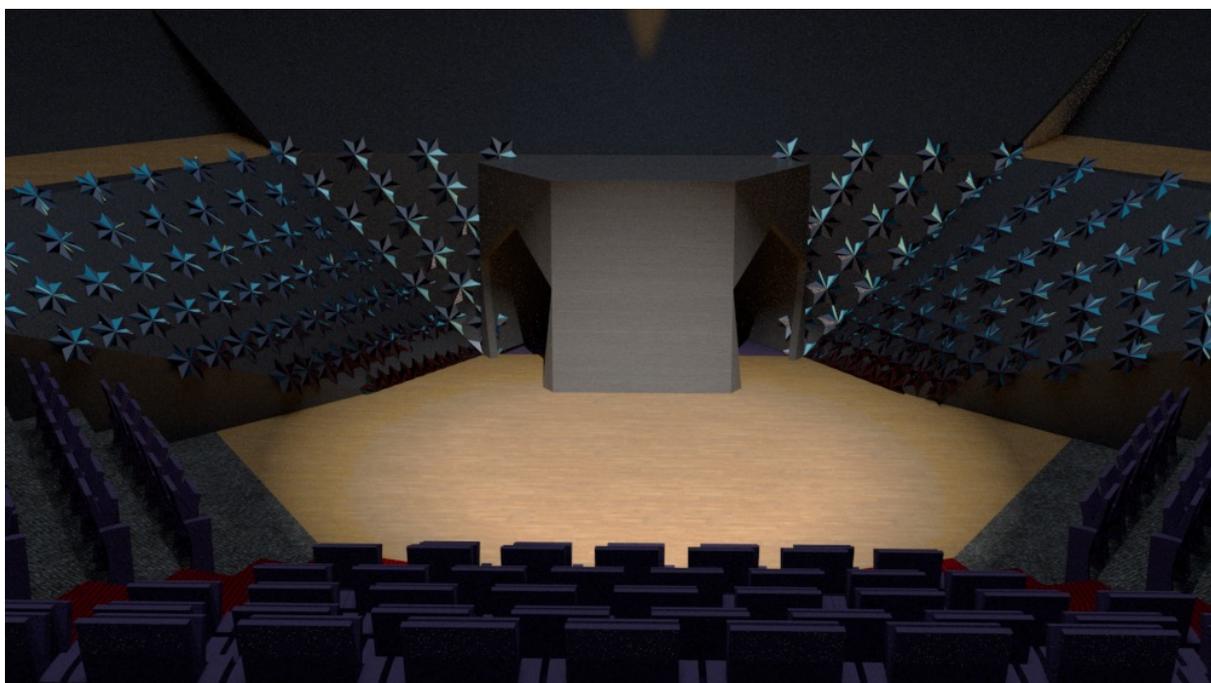


Ilustración 80: iluminación en el escenario. Elaboración propia

4.5.4. Sonido

En un auditorio el sonido es uno de los factores más importantes a tener en cuenta, debido a que estos lugares son espacios diseñados para eventos que involucran el sonido.

El sonido en un recinto presenta siempre un mismo comportamiento básico al encontrarse en un lugar cerrado. En cambio, en un espacio abierto, este se comporta de diferente manera, siendo mucho menos reflexivo. Por esta razón, se considera importante realizar un análisis del comportamiento del sonido en el auditorio tanto en las dos modalidades (En el caso de la cúpula esté abierta o cerrada).

Antes de comenzar con la explicación de cada una de estas modalidades, se debe hacer hincapié en los conceptos básicos del sonido al aire libre y en espacios cerrados. También se menciona un apartado del comportamiento del sonido en la estructura que se diseña.

4.5.4.1. Comportamiento del sonido al aire libre y en espacios cerrados y sus características

El comportamiento del sonido en espacios abiertos es mucho más simple que en espacios cerrados. En los lugares abiertos únicamente hay sonido directo, debido a que generalmente no hay ninguna superficie sobre la que refleje el sonido y por esta razón no existe la reverberación. Debido a esta falta de reverberación, la intensidad del sonido es mucho menor que en un espacio cerrado. (Acústica de exteriores, 2005)

El sonido en un espacio cerrado siempre se caracteriza por tener un mismo comportamiento. Como norma general siempre consta de 2 componentes: el sonido directo y el sonido (Acústica de interiores, 2005)

El sonido directo siempre proviene de la fuente de sonido (La persona, los altavoces...). Este sonido es recibido por el usuario entre 20 y 200 ms después de su producción.

En cambio, el sonido indirecto se genera debido a las múltiples absorciones, difracciones y reflexiones que son generadas por el techo, suelo, paredes y otros objetos presentes en el auditorio. Este fenómeno es conocido como reverberación. (IPI.TEL, 2007)

4.5.4.2. Comportamiento del sonido en el auditorio diseñado

En este caso como ya se ha mencionado anteriormente, este auditorio tiene dos estados: cúpula abierta o cúpula cerrada. Además, cómo se menciona en el apartado de origami, en la zona trasera del escenario se aplica una estructura de estrellas móviles. En cuanto al sistema de la cúpula, esta tiene una importancia a nivel sonoro. En caso de estar cerrada, esta genera que la reverberación aumente. Esto es debido a que las ondas sonoras cuando se dirigen a la parte superior del espacio chocan con la cúpula y esta esparce las ondas sonoras por el resto del auditorio.

De esta manera, se aumenta la intensidad del sonido con muchos menos recursos, ya que estos rebotan sobre las superficies del auditorio.

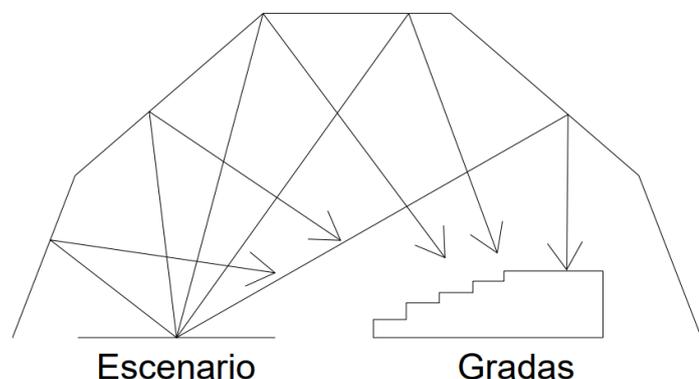


Ilustración 81: Reverberación con las estrellas del escenario.
Elaboración propia

Por otro lado, las estrellas de la parte trasera del escenario cumplen una función similar, aunque en este caso están pensadas para colocarse en caso de que la cúpula esté abierta y no se genere demasiada reverberación. Si las estrellas se encuentran plegadas, estas generan que el sonido que rebota contra ellas se esparza hacia adelante consiguiendo que la intensidad de volumen del auditorio aumente, y de esta forma se optimizan los recursos y el uso de los equipos acústicos.

Para comprobar esta reverberación y las reflexiones que se generan en el techo y en las estrellas se debe hacer una medición del sonido mediante equipos especializados de medición acústica o realizar simulaciones mediante algún programa informático especializado en mediciones acústicas. Debido a la falta de conocimiento sobre este tipo de programas, se plantea como un ejercicio a realizar en líneas futuras.

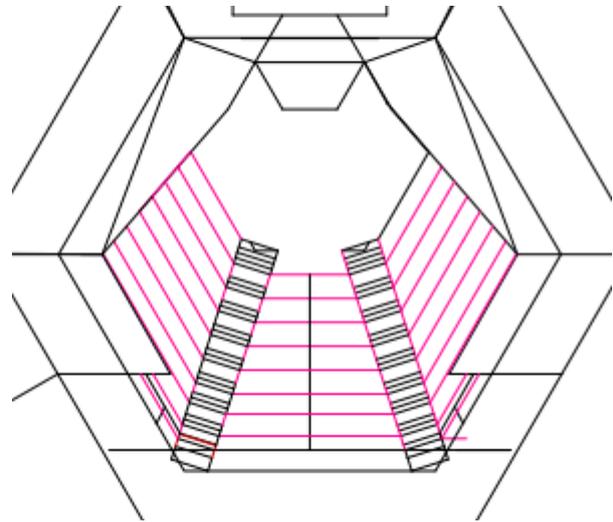


Ilustración 82: Reverberación con las estrellas del escenario. Elaboración propia

4.5.5. Materiales

Madera

Para el escenario de este proyecto se plantea la colocación de suelo de madera para dar una estética mas elegante y moderna. La madera se caracteriza por ser un material natural de calidad, siendo un buen aislante térmico y aportando limpieza al espacio, ya que es un material de baja conductividad. En este caso, se escoge la madera multicapa, debido a que es mejor opción ante la humedad que la madera monocapa.

Moqueta ferial

La moqueta ferial de la marca Hit es una moqueta perforada que esta realizada mediante un 100% de composición de fibra de polipropileno. Esta moqueta es lisa y agradable al tacto y a su vez, contiene una buena estabilidad y resistencia a la abrasión.

Aluminio anodizado

En este caso, el aluminio anodizado se utiliza tanto en la cúpula como en las estrellas. Para poder realizar las dobleces, se aplican una serie de bisagras.

El aluminio anodizado permite una serie de beneficios al aluminio convencional. El anodizado es un proceso superficial que se le realiza al aluminio y quienes genera una capa en su exterior. (Posicionando, 2019)



Diseño de un auditorio
para 130 personas
en la localidad de Trokoniz
utilizando técnicas de origami
y herramientas de realidad aumentada

5

CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

Una vez desarrollado el proceso de diseño dirigido a la elaboración de un auditorio para 130 personas, utilizando técnicas de origami y herramientas de realidad aumentada, y de acuerdo con los objetivos planteados inicialmente, es posible establecer algunas conclusiones parciales:

- El proyecto de este auditorio no es un auditorio convencional, ya que destaca por su valor añadido: el uso de Origami como forma y Realidad Aumentada como visualización. Esto ha permitido acelerar los procesos, reducir los tiempos de ejecución y profundizar en el desarrollo formal de la propuesta.
- En este sentido, el uso del origami como forma es una metodología interesante debido a que le aporta una morfología interesante al proyecto. Además de aportar una estética atractiva y un diseño único, también destaca por su dinamicidad y variabilidad según el entorno o las necesidades del usuario. Por ejemplo, en el proyecto específicamente permitía la apertura o cierre del techo dependiendo del clima; posibilitando, además, a través del movimiento de las estrellas cambiar las características acústicas de la sala, dependiendo de la necesidad sonora.
- Por otra parte, mediante el uso de la realidad aumentada como visualización, fue posible la representación del modelo sobre el terreno, permitiendo observar de manera realista (digitalmente) sin necesidad de su construcción físicamente. Además, esta herramienta permite visualizar la estructura tanto en el emplazamiento concreto del auditorio (Trokoniz) como en el lugar donde se desee visualizarlo. Este valor añadido aporta a la estructura la característica de ser un espacio arquitectónico inteligente, con la capacidad de adaptarse al entorno o a las necesidades de los usuarios.
- Un segundo elemento a destacar es la posibilidad de modificar la forma, permitiendo obtener infinitas variaciones de estructuras, añadiendo el carácter singular al diseño y generando así el valor añadido mencionado. La capacidad de diseñar estructuras dinámicas permite crear un campo innovador de la arquitectura en el que quedan muchos rincones por descubrir.

- Un tercer elemento a considerar es el factor tiempo. Al tratarse de algoritmos, es posible modificar las variables del proyecto, sin pérdida de los conceptos elaborados anteriormente. Es decir, el uso de Grasshopper permite crear estructuras sin necesidad de seguir un proceso lineal. De esta forma, se permite realizar un proceso de diseño iterativo, ya que permite mejorar el modelo las veces que se considere necesario gracias a su estructura de nodos.

Finalmente, y aunque se trata de un anteproyecto, y como tal puede ser mejorado, se considera que se han alcanzado los objetivos propuestos.



Diseño de un auditorio
para 130 personas
en la localidad de Trokoniz
utilizando técnicas de origami
y herramientas de realidad aumentada

6

LÍNEAS FUTURAS

6. LÍNEAS FUTURAS

Para finalizar con el proyecto, se muestran las líneas futuras. En este apartado se proponen las futuras modificaciones y tareas a realizar en caso de continuar con el proyecto.

A continuación, se muestran estas modificaciones:

- **Mayor desarrollo del diseño del proyecto**

Es necesario realizar un desarrollo del proyecto tanto a nivel de detalle como general con la ayuda de un ingeniero y un arquitecto. Esto es debido a que sin ayuda de este tipo de profesionales no se puede conocer los sistemas y metodologías para llevar a cabo una estructura de este tipo la realidad. Sería interesante poder desarrollar un estudio que involucre a diferentes profesionales del medio con el fin de evaluar las ventajas y desventajas de este sistema.

Además, se deben desarrollar las zonas del anfiteatro como el bar, terraza y baños, que al no ser zonas principales del auditorio no han sido desarrollados como las otras zonas principales.

También relacionado con este apartado, se considera importante realizar un análisis de luminarias y de sonido en el interior del auditorio mediante herramientas de computación. Gracias a este tipo de software se puede conocer la optimización de la distribución de estos elementos hoy sin la necesidad de construirlo físicamente.

Por último, sería interesante poder desarrollar un estudio que involucre a diferentes profesionales del medio con el fin de evaluar las ventajas y desventajas de este sistema.

- **Uso de otras herramientas de realidad aumentada**

Como se ha comprobado al realizar el espacio en realidad aumentada, se consigue un espacio funcional e interactivo, pero estéticamente no es idóneo. Por esta razón, se propone la realización de este espacio en realidad aumentada con otras aplicaciones o programas como Unreal engine o Unity.

Aunque estas herramientas son más complejas de usar que Fologram, consiguen resultados más realistas y detallados, logrando una mayor inmersión del usuario en el espacio diseñado.



Diseño de un auditorio
para 130 personas
en la localidad de Trokoniz
utilizando técnicas de origami
y herramientas de realidad aumentada

7

REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Estación de Oriente para la Expo'98—Ficha, Fotos y Planos. (2014). *WikiArquitectura*. Recuperado 20 de julio de 2023, de <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/estacion-de-oriente-para-la-expo98/>

A. Sanz. (2019). https://oa.upm.es/51826/1/TFG_Ambrosio_Sanz_Albertoop.pdf

Acústica de exteriores. (2005). <https://www.ehu.eus/acustica/espanol/salas/acexes/acexes.html>

Acústica de interiores. (2005). <https://www.ehu.eus/acustica/espanol/salas/acines/acines.html>

airearq. (2018, marzo 18). *Pliegues de Origami generan estructuras resistentes de 2 cm de espesor*. Anupama Kundoo. airearq. <https://yrenadabrahma.wixsite.com/airearq/post/pliegues-de-origami-generan-estructuras-resistentes-de-2-cm-de-espesor.-anupama-kundoo>

aislamientosacusticos. (2021, septiembre 30). La importancia de la acústica en un auditorio. *AISLAMIENTOS ACÚSTICOS*. <https://aislamientosacusticos.org/la-importancia-de-la-acustica-en-un-auditorio/>

Algeco. (2015). *¿Qué es el diseño modular y cómo te beneficia?* | Algeco. <https://www.algeco.es/que-es-el-diseno-modular-y-como-puede-beneficiarte>

Andreu, P. (2014). *Gran Teatro Nacional, Pekín—Paul Andreu*. Arquitectura Viva. <https://arquitecturaviva.com/obras/gran-teatro-nacional-pekín-2>

Arquitectura Viva. (2015). *Auditorio, Santa Cruz de Tenerife—Santiago Calatrava*. Arquitectura Viva. <https://arquitecturaviva.com/obras/auditorio-de-tenerife>

Astelus. (2017). *El Auditorio de Tenerife*. Astelus. <https://astelus.com/wp-content/viajes/el-auditorio-de-tenerife.jpeg>

Beziers. (2021, noviembre 29). *We've tried it out for you: The Roman arena in augmented reality!* Béziers Méditerranée Tourist Information Centres. <https://www.beziers-mediterranee.uk/culture/history-and-legends/on-a-teste-pour-vous-les-arenes-romaines-en-realite-augmentee/>

Blog Eraikal. (2013). *Blog Eraikal*. <https://eraikal.blog.euskadi.eus/blog/2013/01/09/funcionamiento-de-la-fachada-en-las-torres-al-bahar/>

BYU. (2017). *BYU engineers built a bulletproof origami shield to protect law enforcement—BYU News*. <https://news.byu.edu/news/byu-engineers-built-bulletproof-origami-shield-protect-law-enforcement>

Dazne, A. (2018, febrero 12). Al Bahar: Torres cilíndricas con celosía inteligente en su fachada. *IS-ARQuitectura.com*. <https://is-arquitectura.com/arquitectura/torres/al-bahar/>

Dezeen. (2016). *Augmented reality will change the way architects work says Greg Lynn*. Dezeen. <https://www.dezeen.com/2016/08/03/microsoft-hololens-greg-lynn-augmented-realityarchitecture-us-pavilion-venice-architecture-biennale-2016/>

Fologram. (2018, agosto 31). [Text]. Food4Rhino. <https://www.food4rhino.com/en/app/fologram>

Giulia Curletto. (2016). *Fig.1: (A) Yoshimura Origami, (b) Waterbomb Origami*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/figure/a-Yoshimura-Origami-b-Waterbomb-Origami_fig1_309952117

ipanema. (2017). *Pokémon Go: El futuro de la gamificación y la realidad aumentada*. <https://www.ipanemacomunicacion.com/blog/pokemon-go-futuro-gamificacion-realidad-aumentada>

IPI.TEL. (2007). *CONCEPTOS BÁSICOS DE ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA*. https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_01_02/estudios_de_grabacion/conceptos.html

LOCALARCHITECTURE. (2018, abril 22). *Capilla temporal para las diaconisas de St-Loup / Danilo Mondada + LOCALARCHITECTURE*. ArchDaily en Español. <https://www.archdaily.cl/cl/892185/capilla-temporal-para-las-diaconisas-de-st-loup-danilo-mondada-plus-localarchitecture>

M. Lirios, (2022). <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/125713>

Maishan, K., & Alibaba, Asst. Prof. Dr. H. Z. (2017). Auditorium Acoustics From Past to Present. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 07(01), 15-23. <https://doi.org/10.9790/9622-0701011523>

Marcos Alba, C. L. (2009). *Espacio material: La arquitectura como extensión topológica (hilemorfismo e hilozoísmo en arquitectura)* [PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.52320>

Martínez, G. (2021, septiembre 13). ¿Qué es Unity y para qué sirve? *Ebac*. <https://ebac.mx/blog/que-es-unity-y-para-que-sirve>

Microsoft, M. (2021). *¿Qué es la realidad aumentada (AR)? | Microsoft Dynamics 365*. <https://dynamics.microsoft.com/es-es/mixed-reality/guides/what-is-augmented-reality-ar/>

Moneo Brock Studio, Arquitectos,. (2012, septiembre 3). *arquiTOUR - Recinto Ferial de Cuenca—Moneo Brock Studio, Arquitectos*. arquiTOUR. <http://www.arquitour.com/recinto-ferial-de-cuenca-moneo-brock-studio-arquitectos/2012/09/>

Muñoz, A. (2019). *Snøhetta + ECADI ganadores del concurso para la Gran Ópera de Shanghai | Sobre Arquitectura y más | Desde 1998*. <https://www.metalocus.es/es/noticias/snohetta-ecadi-ganadores-del-concurso-para-la-gran-opera-de-shanghai>

Muñoz, M. (2022, diciembre 6). *Desplegándose como un origami, los techos de carlo ratti restauran edificio histórico en italia*. designboom | revista de arquitectura y diseño. <https://designboom.es/arquitectura/desplegandose-como-un-origami-los-techos-cineticos-de-carlo-ratti-restauran-un-edificio-historico-en-italia/>

NASA. (2022). *Flower power: NASA reveals spring starshade animation – Exoplanet Exploration: Planets Beyond our Solar System*. <https://exoplanets.nasa.gov/resources/1015/flower-power-nasa-reveals-spring-starshade-animation/>

Oriceps: Origami Inspired Surgical Forceps. (2013, febrero 23). Technology Transfer. <https://techtransfer.byu.edu/oriceps-origami-inspired-surgical-forceps>

Origami.pdf. (2009). Recuperado 20 de julio de 2023, de <https://www.tierradelfuego.gov.ar/wp-content/uploads/2020/04/Origami.pdf>

Posicionando. (2019, diciembre 1). Los beneficios del anodizado de aluminio. *Metrar*. <https://metrar.com.ar/blog/los-beneficios-del-anodizado-de-aluminio/>

Ruiz, Rocío, Alencastre, Moisés, & Muñoz, Lourdes. (2014). *Uso de maquetas digitales de realidad aumentada para el proceso de diseño arquitectónico y la presentación interactiva de proyectos en la carrera de Arquitectura*. <https://repositorio.tec.mx/handle/11285/622517>

sphere360. (2016). *Pentagonal High-Tower Spring*. Instructables. <https://www.instructables.com/Pentagonal-High-Tower-Spring/>

Unreal Engine. (1998). *Unreal Engine | The most powerful real-time 3D creation tool*. Unreal Engine. <https://www.unrealengine.com/en-US/>

UTZON. (2015). Ópera de Sydney—Ficha, Fotos y Planos. *WikiArquitectura*. <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/opera-de-sydney/>

Yasemin, E. (2022, junio 7). *Splendid Mežaparks Open-Air Stage Gets Renovated By Mailitis Architects*. *Parametric Architecture*. <https://parametric-architecture.com/mezaparks-open-air-stage-by-mailitis-architects-j-pogas-birojs/>

Zorrozua Asociados. (2021, febrero 1). *El Origami En La Arquitectura | Zorrozua Asociados*. <https://zorrozua.es/origami-en-arquitectura/>