



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Arquitectura Programa Único de Especializaciones en Arquitectura Especialización en Diseño de Cubiertas Ligeras

“Cubierta habitable adaptable ante condiciones ambientales cambiantes”

**Trabajo Terminal que para obtener el título de “Arquitecto Especialista en Diseño de Cubiertas Ligeras” presenta:
Arq. Rodolfo Rodríguez Muñoz**

**Director de Trabajo Terminal:
Arq. EDCL. Marcos Javier Ontiveros Hernández**

**Sinodales:
Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas
Mtro. Miguel Enrique Sánchez Hernández
Mtra. Susana Ezeta Genis
Mtro. Ramón Abud Ramírez**

Cd. Mx. 14-09-2024



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Arquitectura Programa Único de Especializaciones en Arquitectura Especialización en Diseño de Cubiertas Ligeras

“Cubierta habitable adaptable ante condiciones ambientales cambiantes”

Trabajo Terminal que para obtener el título de “Arquitecto Especialista en Diseño de Cubiertas Ligeras” presenta:
Arq. Rodolfo Rodríguez Muñoz

Director de Trabajo Terminal:
Arq. EDCL. Marcos Javier Ontiveros Hernández

Sinodales:

Dr. Juan Gerardo Oliva Salinas

Mtro. Miguel Enrique Sánchez Hernández

Mtra. Susana Ezeta Genis

Mtro. Ramón Abud Ramírez

14-09-2024



PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL

De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado

Cubierta habitable adaptable ante condiciones ambientales cambiantes
Que presenté para obtener el grado de Especialista en Diseño de Cubiertas Ligeras
es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas con el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de graduación.

Atentamente

Rodolfo Rodríguez Muñoz  310518251
(Nombre, firma y número de cuenta del alumno/a)

Índice

1. Introducción, justificación y objetivo	12
2. Estado del arte	14
2.1 Edificaciones análogas	16
2.2 Materiales y tecnologías existentes	26
3. Metodología y proceso de diseño	30
3.1 Proyecto conceptual e intenciones de diseño	32
3.2 Búsqueda de áreas de oportunidad mediante el diagrama filogenético	33
3.3 Búsqueda de forma mediante RhinoVAULT 2	38
3.4 Teselación mediante Kangaroo Physics - Meshmachine	41
3.5 Propuesta de estructura portante (gridshell)	43
3.6 Experimentación y análisis de estrategias mecánicas adaptables	48
3.7 Análisis mecánico-formal mediante Karamba 3D	58
3.8 Síntesis y aplicación de resultados	62
4. Diseño y aplicación	74
4.1 Anteproyecto arquitectónico	76
4.2 Programa, planos y visualizaciones arquitectónicos	82
4.3 Estructura	112
4.4 Módulos mecánicos adaptables	126
5. Conclusiones	132
6. Referencias	138
7. Anexos	146

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Rosalía y Rodolfo por darme la vida, su amor incondicional, sacrificios, dedicación, apoyarme y guiarme a lo largo de mi vida y hacer de mí una persona con valores. Sin ustedes, nada habría sido posible. Mis éxitos son los suyos.

A mi familia por estar siempre presentes, sus palabras y actos de apoyo y constante interés en mi desarrollo como persona y estudiante.

A Nancy por su amor, tolerancia, paciencia, estar en los momentos altos y bajos, ser mi soporte y confidente.

Al doctor Juan Gerardo Oliva por abrirme las puertas del Laboratorio, presentarme el mundo de las estructuras ligeras, permitirme colaborar con los Proyectos de Investigación, ser un ejemplo a seguir y continuarme guiando en esta etapa de mi formación profesional.

A mi director de Trabajo Terminal, el arquitecto especialista Marcos Javier Ontiveros por compartir su conocimiento, su paciencia, su comentario siempre atinado, preocuparse por mejorar activamente el programa de la Especialización y su mejor disposición con la formación de profesionales calificados.

A mis asesores el maestro Miguel Enrique Sánchez, la maestra Susana Ezeta y el maestro Ramón Abud por su guía, comentarios, correcciones y apoyo a lo largo de la Especialización y el desarrollo de este documento.

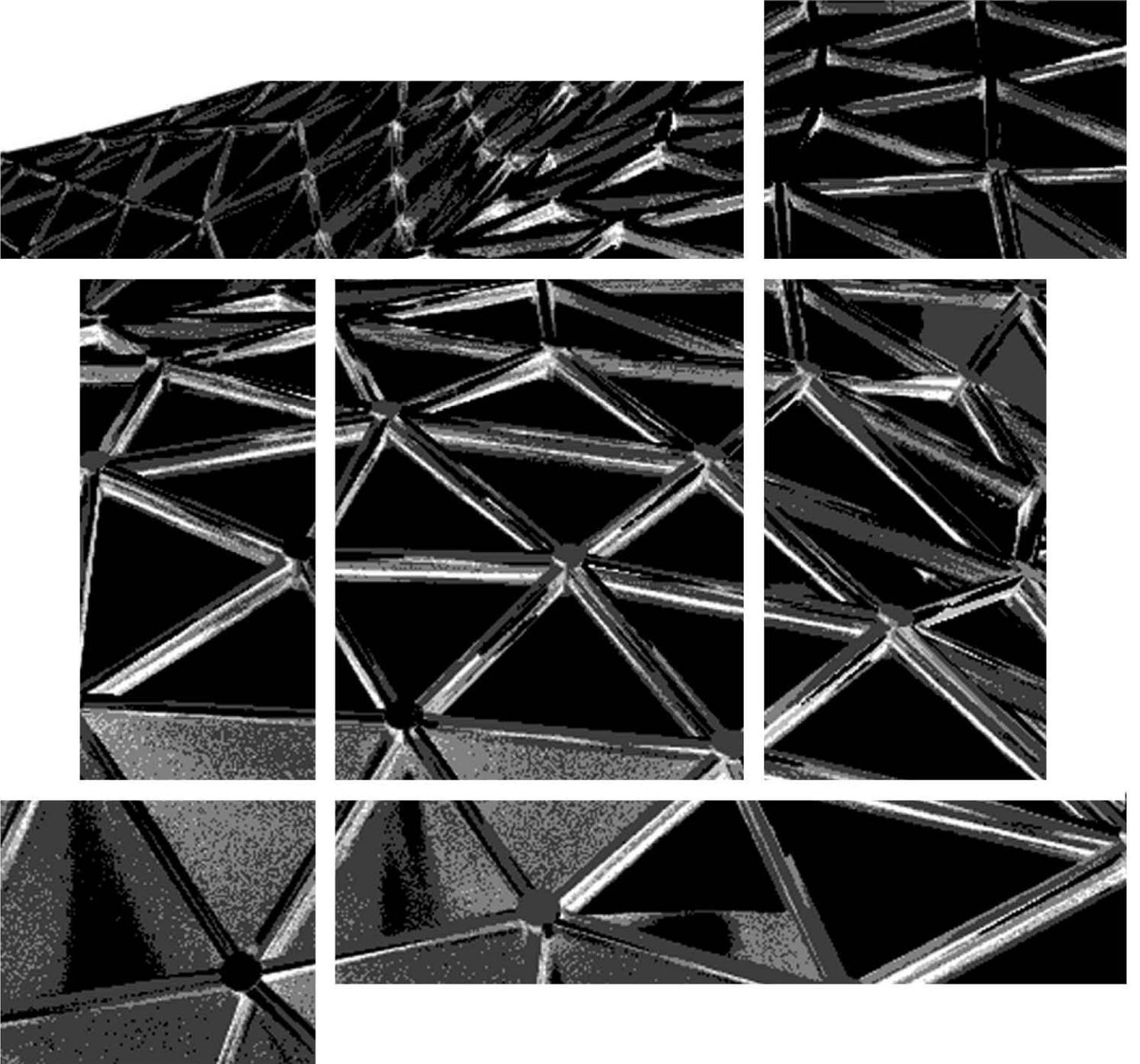
A la UNAM, la Facultad de Arquitectura, al Laboratorio de Estructuras Ligeras, a la Especialización en Diseño de Cubiertas Ligeras y mis profesores por seguirme recibiendo como mi segunda casa, los conocimientos obtenidos y continuarme formando como arquitecto.

A mis amigos y compañeros del Laboratorio por haber compartido muchos momentos y retos, por seguir creciendo juntos y un futuro con éxitos para todos.

A la memoria de Eunice por su cariño y cuidado. Se que estarías orgullosa y que tú, y todos me siguen apoyando desde donde están. Los llevo siempre conmigo.



1. INTRODUCCIÓN



INTRODUCCIÓN

El planeta tierra es cambiante y finito. Al igual que todo aquello en el universo, tiene un ciclo de vida, y dentro de ese ciclo, momentos estables e inestables. La tierra es efímera y frágil, como lo son los seres vivos que en ella se han desarrollado.

El ser humano, es, comparado con la tierra, insignificante en tamaño. Sin embargo, el impacto que las poblaciones humanas han dejado en el planeta durante los últimos siglos demuestra la capacidad humana de destruir el medio ambiente y las posibilidades de sobrevivencia de la biodiversidad.

Como respuesta a dicha problemática, estrategias para reducir el deterioro al ambiente han emergido, y el papel de los arquitectos en esta labor se ha vuelto cada vez más latente, como los encargados de proveer soluciones de habitabilidad para los seres humanos. Más es importante recordar, que ya sea que los seres humanos modifiquen su conducta o no, el planeta es cambiante, y no siempre será habitable de la misma forma que lo es el día de hoy, debido a su propio ciclo de vida.

Mientras en la actualidad existen diversos lugares con condiciones climáticas cambiantes y hostiles, esta conducta se multiplicará en un futuro. El ser humano necesitará con mayor urgencia, entonces, edificaciones que le permitan garantizar su supervivencia ante la aparición de eventos climáticos adversos, protegiendo a la par así mismo de la naturaleza, y a ella de su especie.

El proyecto presentado busca generar una cubierta habitable, adaptable ante condiciones climáticas cambiantes y adversas, la cual permita a los seres humanos, preservar condiciones de vida favorables en su interior, a pesar de la presencia de condiciones diversas de temperatura, viento, luz y precipitación en el exterior, alojando en un interior de 3544.59 m² a 48 personas, y satisfaciendo sus necesidades de subsistencia.

Es importante aclarar, que este proyecto estudia la respuesta de su sistema estructural, mecánico y térmico, ante condiciones ambientales adversas. El presente documento no busca el emplazamiento de dicho proyecto en una ubicación específica. En cambio, busca despertar en los diseñadores de cubiertas la actitud de búsqueda de nuevas soluciones y la exploración con nuevos sistemas y materiales, para la creación de soluciones óptimas.

JUSTIFICACIÓN

Las cubiertas son un medio para la creación de espacios habitables. Estas pueden tener distintos fines, sin embargo, es importante recordar que mediante ellas es posible manipular las condiciones de permeabilidad en un espacio. La anterior premisa abre paso a la posibilidad de utilizar las cubiertas ligeras como un medio de adaptabilidad y supervivencia para los seres humanos cuando las condiciones de su ambiente son poco favorables.

En este documento se explorará la posibilidad del uso de materiales y cambio de fase en conjunto con un sistema de mecanización para darle el dicho uso a una cubierta, evaluando el estado de la tecnología actual, sus posibles aplicaciones, y las fortalezas y debilidades del sistema propuesto.

OBJETIVO

Proponer un sistema de cubierta ligera de respuesta adaptable ante condiciones ambientales exteriores garantizando la preservación de las condiciones habitables interiores, mediante la utilización de un sistema estructural con respuesta mecánica adaptable y el uso de materiales inteligentes.

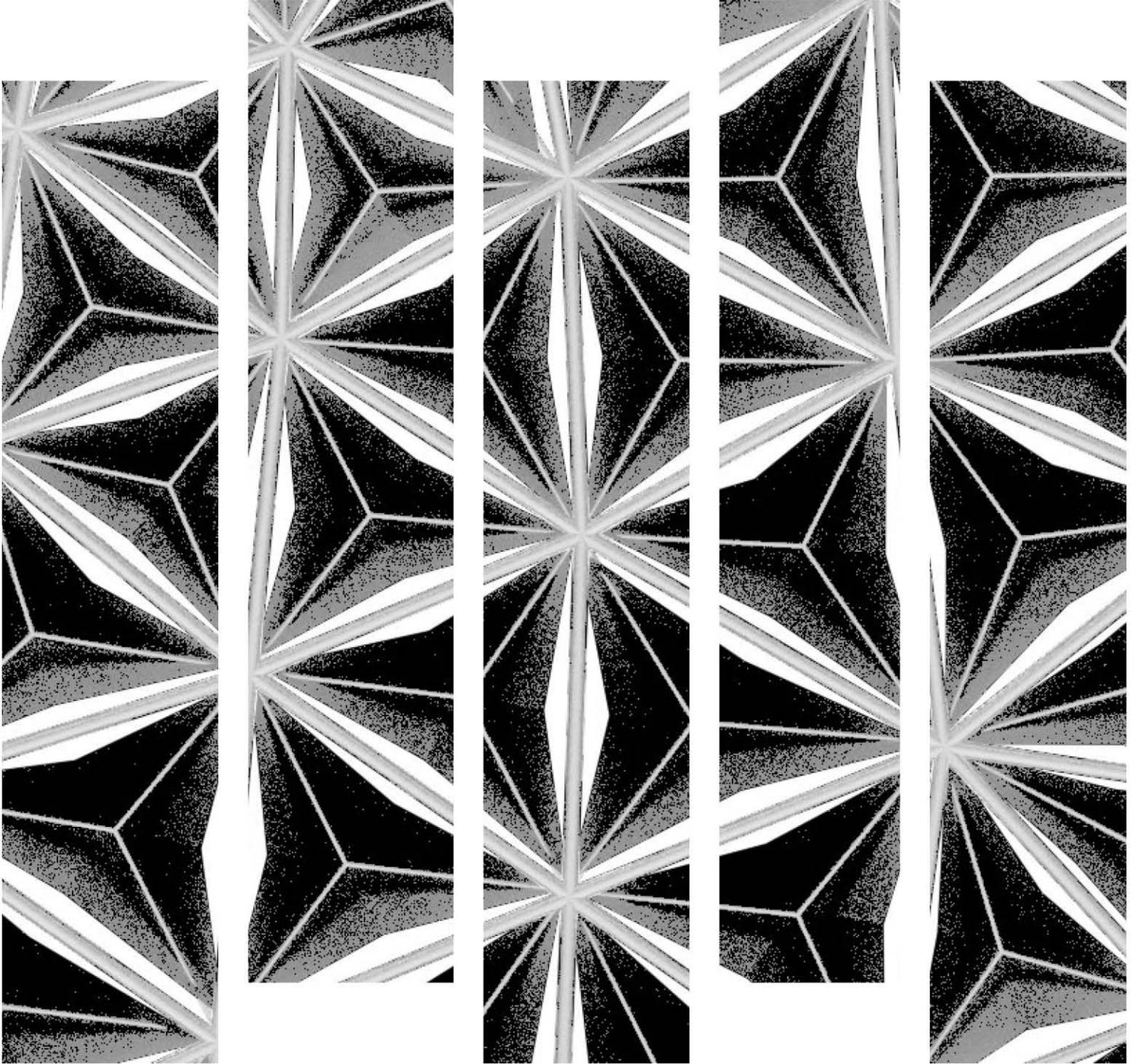
Además de atender la problemática del proyecto arquitectónico y la cubierta con un sistema estructural congruente para tal fin, éste documento se centra en el diseño, generación y aplicación de un módulo mecánico adaptable como parte integral de la geometría de la cubierta. Los cuales, mediante el uso de sensores y actuadores permita modificar las condiciones de intercambio de una serie de variables de comfort entre el interior y el exterior de los espacios.

La cubierta debe ser capaz de almacenar calor del ambiente y del sol con la posibilidad de liberarlo al interior de la edificación cuando sea necesario incrementar la temperatura interna en la misma, y viceversa.

Así mismo deberá tener la capacidad de modificar la cantidad de luz, aire y humedad que ingresa al interior y actuar en consecuencia según las lecturas recibidas por los sensores a lo largo del desarrollo de la estructura, su cubierta y módulos mecánicos adaptables.



2. ESTADO DEL ARTE



2.1 EDIFICACIONES ANÁLOGAS

La presente sección se enfoca en el estudio de edificaciones de dos tipos:

- 1) Aquellas cuya tipología es similar a la del proyecto propuesto y su principal enfoque es el control térmico,
- 2) Aquellas que contienen una respuesta de adaptabilidad, ya sea mecánica o mediante el uso de nuevos materiales.

Los proyectos a analizar se expondrán de forma cronológica, permitiendo así visualizar de manera más clara la manera en la que los avances tecnológicos en el campo se han dado y la forma en la que los proyectos han buscado optimizar las soluciones empleadas por sus predecesores. Como consecuencia, es posible analizar los aspectos de edificaciones pasadas que deben ser retomados, y al mismo tiempo, los campos de oportunidad existentes.

Edificaciones enfocadas en el control térmico y ambiental.

Desde los inicios de la humanidad, los seres humanos han buscado protegerse de su ambiente. Inicialmente mediante el uso de cuevas como refugio, recientemente, mediante la elaboración de construcciones de gran escala.

Algunas soluciones básicas de supervivencia ante climas extremos fueron: la construcción de iglús y elaboración de viviendas bajo tierra en climas extremadamente fríos o con altos riesgos de tornados. La construcción de templos y comunidades esculpidos en el interior de las montañas, en zonas altamente cálidas, en especial en el continente africano.

El uso de techumbres inclinadas en zonas altamente lluviosas, etc. Todas estas estrategias buscaron aprovechar las condiciones y materiales existentes en la ubicación de sus construcciones.

Biosfera de Montreal (Pabellón de EUA).

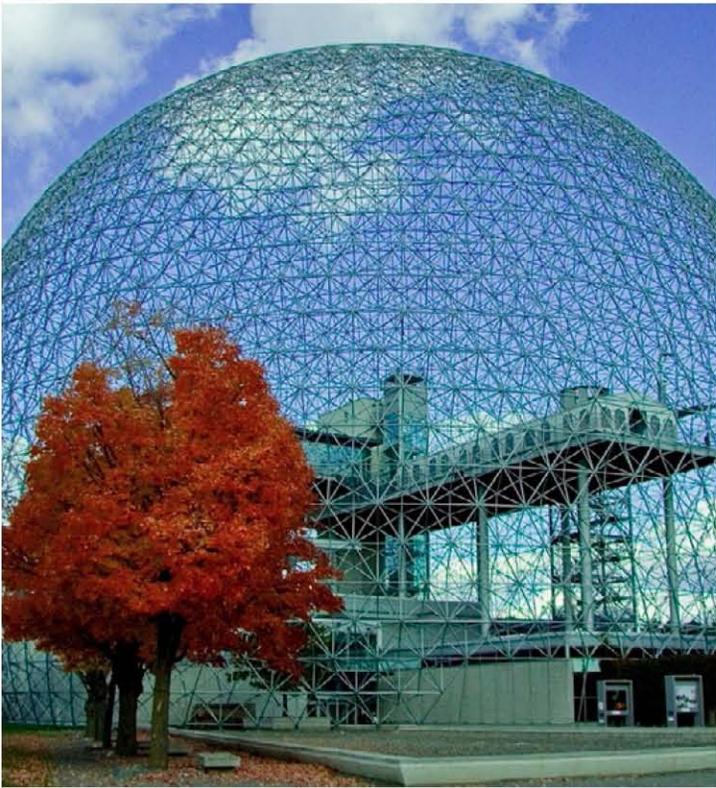
Originalmente fue concebido como el Pabellón de los Estados Unidos para la Exposición Universal de Montreal en 1967 con el lema "El Hombre y su mundo". La estructura de 76 metros de diámetro y 62 metros de altura, originalmente se encontraba cubierta con módulos de acrílico transparente, los cuales se perdieron durante un incendio en 1976.

La geometría consiste en una geodésica, resultante de la subdivisión de un icosaedro en triángulos equiláteros, generando una geometría que visualmente da la apariencia de una esfera.¹

La estructura consta de tubos de acero de 3" soldados en sus nodos, con cambios de sección ligera en la parte cenital de la geodésica. Utiliza la premisa de que la esfera puede contener el mayor volumen con el menor desarrollo de superficie, y por lo tanto contribuye al ahorro de material, dando como resultado una estructura que trabaja por forma y no por masa.²

La eficiencia del domo geodésico es el resultado de varios aspectos: La menor cantidad de material es necesaria para realizar su construcción. El aire dentro de ella transita libremente debido a que no tiene obstrucciones lo que permite que la calefacción y el enfriamiento ocurran naturalmente. La acción del viento se ve disminuida debido a que por su forma lo disipa de manera óptima a su alrededor. Actúa como un reflector de faro gigante que apunta hacia abajo y refleja y concentra el calor interior, lo que ayuda a prevenir la pérdida de calor radiante.

Actualmente la estructura de barras y nodos se mantiene únicamente como un esqueleto, y sus paneles nunca fueron recolocados. Alberga en su interior un edificio de siete niveles, correspondiente al museo del medio ambiente en Montreal.³

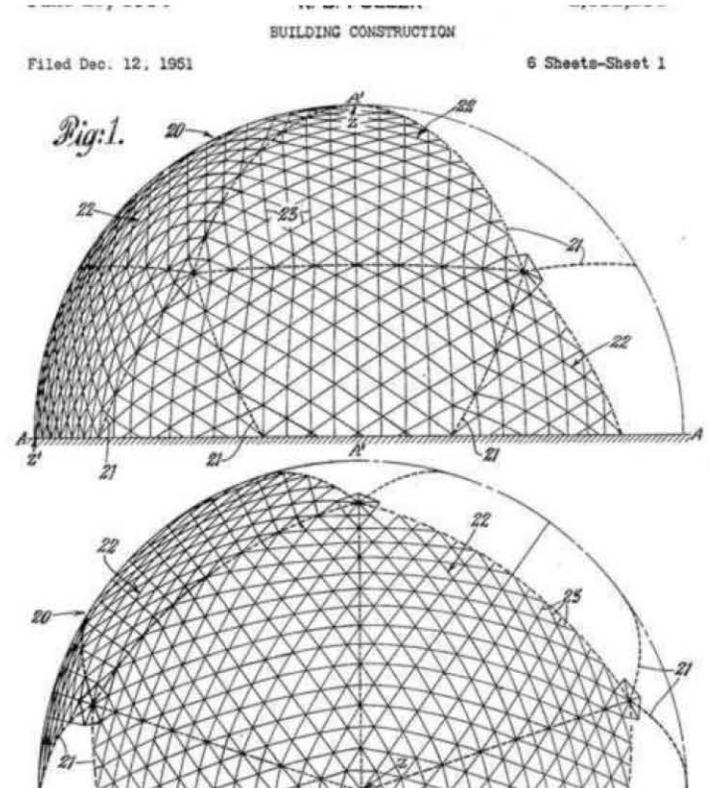


Biosfera de Montreal (Pabellón EUA) : Richard Buckminster Fuller, Montreal, Canadá. 1967.
 Imágenes retomadas de: <<https://www.archdaily.com/572135/ad-classics-montreal-biosphere-buckminster-fuller>>

Biodomo de Montreal (Velódromo olímpico).

Fue construido originalmente como velódromo, parte de las instalaciones olímpicas para los juegos olímpicos de Montreal en 1976. En 1989 cambió de uso a "biodomo" y para 1992 se convirtió en un museo viviente capaz de albergar distintas especies animales y vegetales en sus respectivos ecosistemas: Selva del Amazonas, Bosque de San Lorenzo, Golfo de San Lorenzo, Polo Norte y Polo Sur.⁴

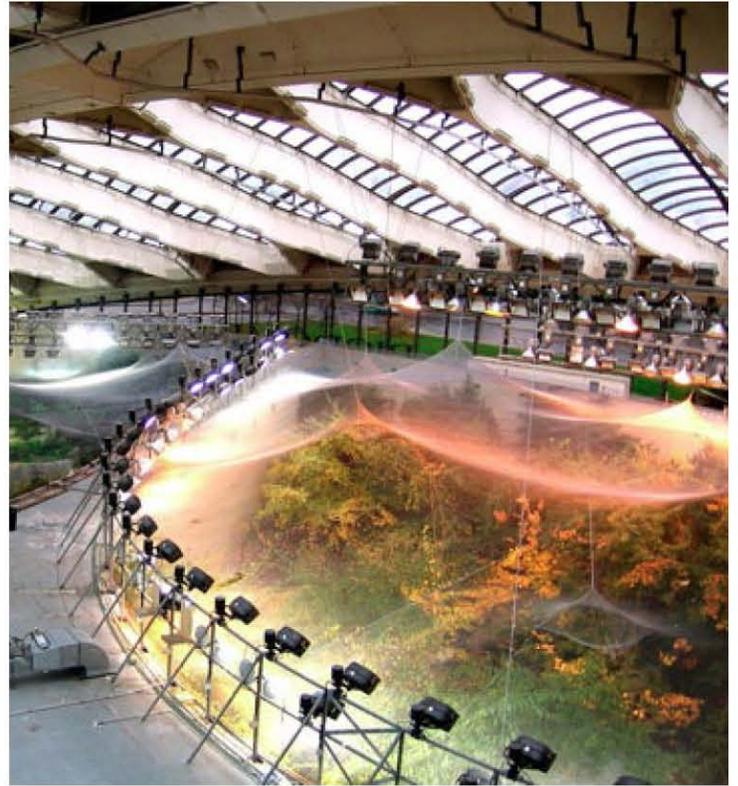
En su interior cada ecosistema se encuentra completamente aislado. Cada uno utiliza distintas técnicas de control climático para generar el clima deseado. Algunas soluciones son: luz artificial y ventilación mecánica con la posibilidad de ajustar su intensidad, caídas de agua y estanques,



humidificadores, y la introducción de especies vegetales y animales base de dicho ecosistema.⁵

La estructura consta de una cubierta de 5,500 m² repartidos en tres lóbulos y tres pares de arcos de concreto armado esféricos aplanados, con claros de 170 m. Dichos arcos se cierran en tres soportes del lado contrario. Una vez colados los arcos de concreto, se colocaron lucernarios.⁶

En su momento, para realizar dicha estructura, fue requerido desarrollar un software específico para su cálculo y análisis. En 2018, el museo fue cerrado para ser reacondicionado, donde únicamente los espacios interiores fueron modificados y optimizados, sin afectar su estructura.⁷



Biodomo de Montreal (Velódromo Olímpico) : Roger Tailibert, KANVA y NEUF Architects, Montreal, Canadá, 1976. *Imágenes retomadas de: <<https://ecosystem-energy.com/case-studies/biodome-space-for-life-montreal/>>*

Proyecto Edén.

El proyecto es un centro de investigación y turístico concebido por Tim Smit y diseñado por Grimshaw Architects, que busca generar conciencia sobre la importancia de las especies vegetales en el planeta.⁸

Tiene una extensión total de 50 hectáreas, dentro de las cuales existen dos "biomas" los cuales son invernaderos que buscan reproducir un clima. Los climas elegidos fueron el mediterráneo y el tropical lluvioso. Los invernaderos se componen de diversas cúpulas geodésicas interconectadas entre ellas, con posibilidades mecánicas en su parte superior.⁹

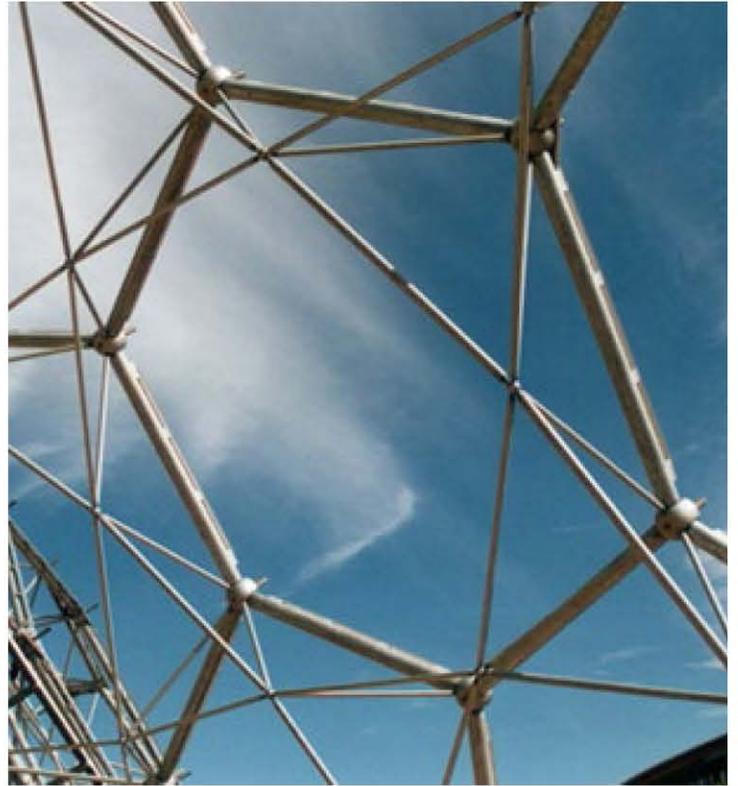
Aunque originalmente el plan maestro mostraba una geometría continua, la compañía MERO, de la cual el doctor Jaime Sánchez - Álvarez siendo parte colaboró, siendo ésta la

encargada de la solución estructural, cambió la geometría por cúpulas unidas entre sí.¹⁰

Una estructura geodésica es adoptada para evitar el uso de apoyos internos, esta estructura sigue el icosaedro directamente como solución estructural.

El proyecto fue realizado mediante estructuras de barras y nodos. Los perfiles utilizados fueron tubulares de acero.

Se incluyeron diferentes tipos de nodos, dependiendo de su ubicación. Adicionalmente, se requirió el uso de diagonales en toda la estructura. La piel de la cubierta consiste en una membrana plástica rellena de aire, a manera de colchones. El material elegido fue EFTE, debido a su menor peso y mayor paso de rayos UV en comparación con el cristal.¹¹



Proyecto Edén : Grimshaw Architects, Bodelva, Cornwall, UK. 1998. *Imágenes retomadas de:* <http://www.studioeverini.eu/res/DocumentiPDF/eden_project_english.pdf-2> y <<https://inspiration.detail.de/eden-project-in-st-austell-107351.html>>

Gardens by the bay.

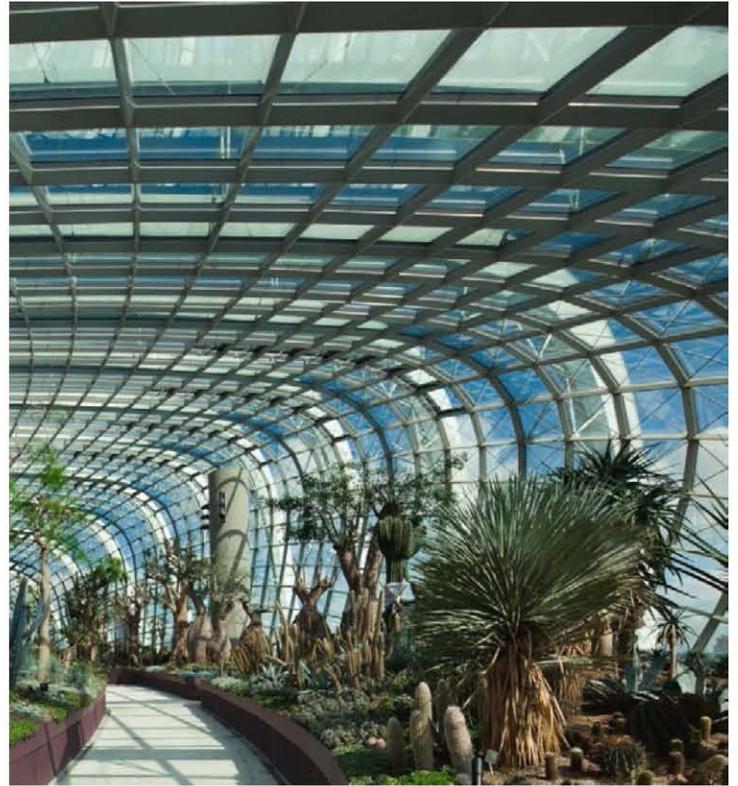
Este proyecto fue diseñado para ser un centro turístico en la bahía de Singapur. Cuenta con una serie de estructuras que permiten un recorrido a través del paisaje. Con este proyecto, el país buscó demostrar su capacidad tecnológica y su liderazgo en el área de paisajismo.¹²

Dentro del proyecto se encuentran dos conservatorios climatizados, los cuales permiten el cultivo de plantas diversas. Estos espacios pueden ser visitados y recorridos.

A diferencia de proyectos anteriores analizados, estas estructuras buscan combatir un clima caliente y húmedo en el exterior, proporcionando espacios de confort térmico en el interior.

La estructura de los conservatorios o ecosistemas artificiales se encuentra formada por domos irregulares. La generación de estas superficies se basa en la hipérbola, forma que se mantiene gracias a su estructura de red, arcos portantes y soporte del terreno.¹³

La estructura portante es a base de arcos de acero de perfiles tubulares huecos, de los cuales se cuelga una estructura de acero reticular, la cual soporta los paneles de vidrio. Este proyecto tiene la necesidad de minimizar la transmisión de luz, por lo cual, las secciones de su malla fueron elegidas de tal forma que generaron la mayor cantidad de sombra posible. Su sistema térmico integra cada uno de los componentes del parque, ya sea utilizando los elementos como fuente de energía o como unidad de descarga de esta.¹⁴



Gardens by the Bay: Wilkinson Eyre y Grant Associates., Singapur. 1998. *Imágenes retomadas de:* <<https://www.timeout.com/singapore/attractions/floral-fantasy>> y <https://www.archdaily.com/324309/cooled-conservatories-at-gardens-by-the-bay-wilkinson-eyre-architects?ad_medium=gallery>

Jewel Changi Airport.

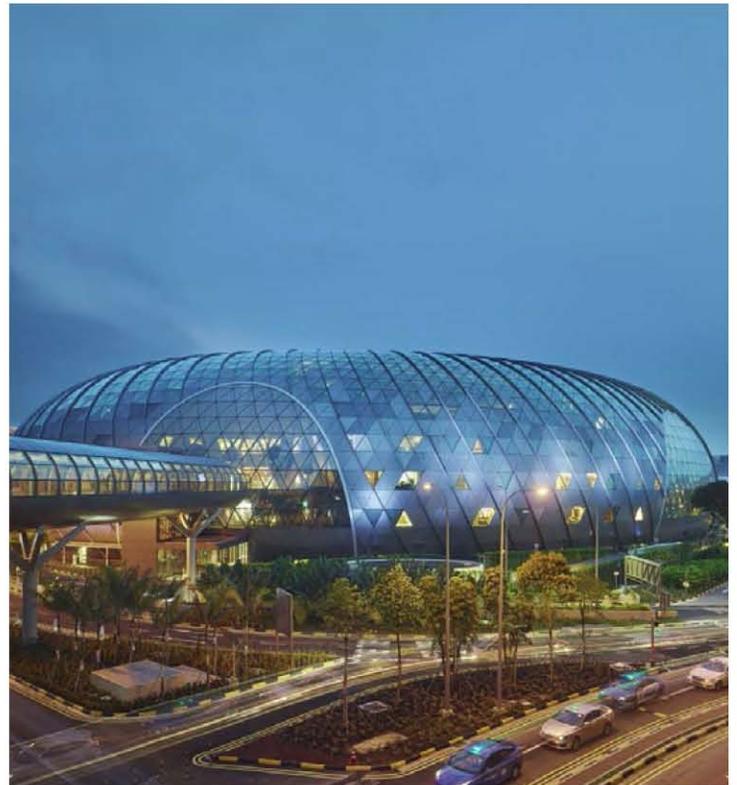
Se diseñó como una zona de recreación y comercio que permitiera ofrecer diversas facilidades de recreación, operación e incluso descanso entre terminales de aeropuerto.¹⁵

La geometría consiste en un toroide, con un óculo invertido en el centro, por el cual caería agua generando una cascada artificial, dedicada a la apreciación y generación de espectáculos con agua y luces. El acomodo de los espacios y desarrollo de la geometría obedeció a un estudio de lo ya existente en el aeropuerto.

La cascada, tiene una caída equivalente a 5 niveles en el área de jardín y dos más dentro de la zona comercial. Este elemento es conocido como la mayor cascada dentro de un edificio del mundo, con un flujo de 10 mil galones por minuto.

Las zonas jardinadas tienen un área de 14.000 m². La cubierta fue realizada mediante una gridshell de acero inoxidable y cristal. Cubre un aproximado de 7 niveles y unas dimensiones en planta de 210 x 156 m. ¹⁶

El perímetro fue rigidizado mediante una trabe. La estructura de barras y nodos está soportada en todo el perímetro del edificio y en el anillo interior. Los nodos fueron diseñados para recibir seis barras rectangulares cada uno, generando así una retícula triangulada, lo cual garantiza el uso de paneles planos. La cubierta también es soportada por 14 columnas arbóreas de perfiles tubulares que se entierran en la estructura de concreto. Las columnas arbóreas fueron colocadas en puntos estratégicos para ayudar a soportar las cargas de la cubierta. La cimentación y los niveles se encuentran realizados en concreto reforzado.¹⁷



Jewel Changi Airport : Safdie Architects, PWP Landscape y WET Design, Singapur. 2014. *Imágenes retomadas de:* <<https://www.safdiearchitects.com/projects/jewel-changi-airport>> y <<https://archello.com/es/story/28441/attachments/photos-videos/1Z>>

Amazon Spheres.

El proyecto fue diseñado como un área de nuevas oficinas para la compañía americana Amazon. Lo más relevante de este proyecto son tres esferas de vidrio que albergan oficinas y un jardín botánico con más de 400 especies, algunas de estas ya extintas fuera del ecosistema artificial.

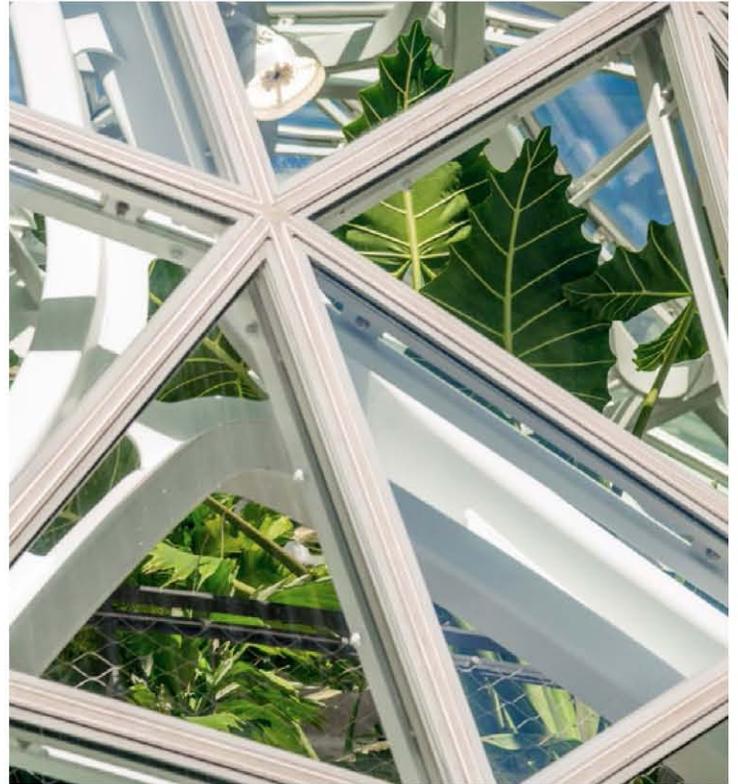
El clima en las esferas se establece en 22°C y 60% de humedad durante el día y luego cambia a 12°C y 90% de humedad durante la noche. ¹⁸

La estructura se encuentra realizada en acero, y está compuesta de 180 módulos pentagonales alargados inspirados en el trabajo del matemático belga Eugène Charles Catalan, y definidos por los puntos de cinco arcos soldados. La geometría proviene de la modificación de un Hexecontaedro Pentagonal. ¹⁹

Mientras que la estructura está curvada en dos direcciones, los 2,643 paneles de vidrio con bajo contenido de hierro son planos. Una viga de aproximadamente 180 toneladas en la base del edificio transfiere la gravedad, el viento y las fuerzas sísmicas de la fachada de vidrio y acero a columnas de concreto en los pisos inferiores y a un núcleo central de concreto.

Edificaciones enfocadas en la adaptabilidad.

La presente sección se enfoca en la descripción de tecnologías de adaptabilidad para edificaciones, en específico aquellas que permiten el movimiento de elementos en su fachada con el objetivo de adaptarse a condiciones climáticas de su ambiente y proporcionar mayor confort en el interior de las edificaciones. La tipología de dichas edificaciones es diversa, desde rascacielos hasta pequeños pabellones.



Esferas de Amazon: NBBJ, Seattle, Washington, EUA., 2018. *Imágenes retomadas de: <<https://www.archdaily.mx/mx/936526/esferas-de-amazon-nbbj>>*

Instituto del mundo árabe.

El proyecto fue desarrollado en conjunto por la Liga de Naciones Árabes y el gobierno francés, con el fin de enaltecer las relaciones entre los mismos.

Se trata de un museo a las orillas del río Senna de 16,912 m² y 11 niveles con múltiples salas de exhibición, restaurante, librería oficinas y auditorio. Su estructura principal es de marcos de acero.²⁰

Su elemento más icónico es la fachada sur, en donde se encuentran las "mashrabiya", elementos que se inspiran en los utilizados desde hace siglos por las culturas de Medio Oriente para proteger interiores del sol y dar privacidad.

Cada vidrio cuenta con una serie de células fotoeléctricas semejantes al diafragma de una cámara, uno más grande al centro y 14 en su perímetro.

Estas células se abren y cierran dependiendo de la cantidad de luz que reciben. Así, crean un juego estético en la fachada, y al mismo tiempo mitigando la entrada de luz solar, manteniendo el confort y conservando energía.



Institut de Monde Arabe : Enrique Jan, Jean Nouvel y Architecture-Studio, París, Francia. 1987.
 Imágenes retomadas de: <https://www.archdaily.com/162101/ad-classics-institut-du-monde-arabe-jean-nouvel?ad_medium=gallery>

Torres Al Bahar.

Se trata de un conjunto de oficinas compuesto por dos torres de 25 niveles cada una, diseñado y construido a partir de un concurso para el desarrollo la nueva sede del Consejo de Inversiones de Abu Dhabi, y con miras al cumplimiento del plan de Desarrollo 2030 del emirato.

El equipo de diseño paramétrico y computacional desarrolló una geometría con paneles móviles en la fachada, los cuales responden a la exposición al sol, para cambiar el ángulo de incidencia de este de acuerdo con los requerimientos necesarios.

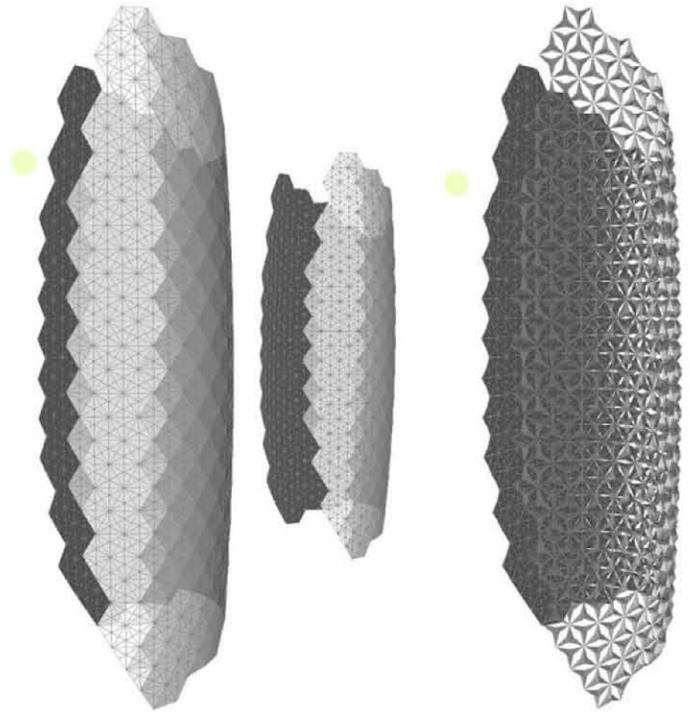
Por la noche todas las pantallas se pliegan y a medida que el sol aparece y cambia en el edificio se cierran dependiendo de su posición.

Estos paneles están colocados sobre un muro cortina fuera de la fachada de vidrio, recubiertos con fibra de vidrio microperforada, y programado para responder de forma independiente.

Debajo de cada uno existe una cobertura de PTFE, la cual se acciona por medio de actuadores lineales, que abren y cierran progresivamente.

El sistema aprovecha la energía solar mediante el uso de celdas fotovoltaicas en la mayoría de su fachada norte.

Se estima que esta pantalla de paneles reduce la ganancia del sol en 50% y reduce la necesidad de aire acondicionado y luz artificial al interior de los pisos, así como el deslumbramiento.²¹



Torres Al Bahar: Abdulmajid Karanouh y Aedas Arquitectos., Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos., 2012. *Imágenes retomadas de: <<https://www.archdaily.mx/mx/02-226760/las-torres-al-bahar-y-sus-fachadas-sensibles-por-aedas-architects>>*

Bloom.

Este pabellón es parte de la investigación realizada por la arquitecta Doris Sung, a partir de la experimentación con metales de diferente aleación como materiales para la generación de arquitectura responsiva.

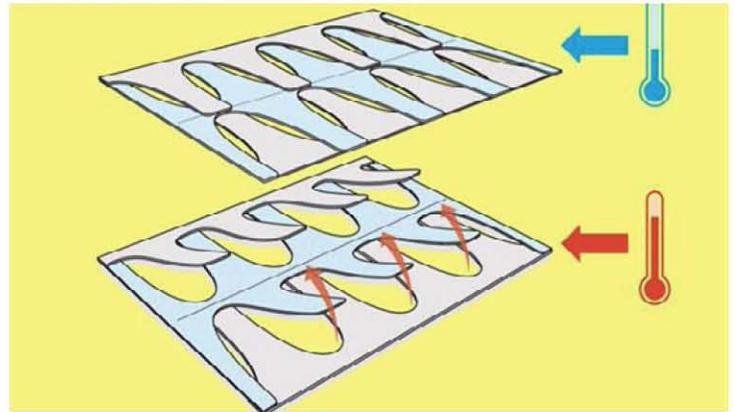
Se diseñó un pabellón compuesto de 414 paraboloides hiperbólicos inscritos en paneles interconectados, que unidos, imitan el trabajo estructural de un cascarón autoportante.²²

Los paneles contienen dos tipos de metales de cambio de fase, los cuales siguen el principio de dilatación, y toman una curvatura diferente al ser aplicado calor sobre ellos, sin necesidad de controles o de energía externa. Los suajes en la superficie están diseñados para permitir el paso de aire al interior.

Para optimizar la capacidad estructural del pabellón se utilizan subdivisiones y conexiones entre los paneles, según lo requieran. Se cree que el uso de este sistema reduciría la utilización de aire acondicionado e iluminación artificial en una edificación.²³

Comparativa. (Tabla 1, pág. 23)

Finalizando el apartado de edificaciones análogas, se realizó una tabla comparativa con aspectos como: función, año de construcción, material principal de la estructura y cubierta, sistema constructivo, si cuenta con mecanización adaptable así como ventajas y desventajas. Ello con el fin de retomar las variables más apropiadas y aplicables para el proyecto en curso y evitar las desfavorables. Entendiendo que cada una tiene contextos temporales, funcionales y climáticos distintos.



Bloom : DO/SU Studio Architecture, Silver Lake, California, EUA., 2012. Imágenes retomadas de: <https://www.archdaily.com/215280/bloom-dosu-studio-architecture?ad_medium=gallery>

Tabla 1. Comparativa entre edificios análogos, ventajas y desventajas

Proyecto	Bioesfera de Montreal	Biodomo de Montreal	Proyecto Edén	Gardens by the Bay	Jewel Changi Airport	Amazon Spheres	Instituto del mundo Árabe	Torres Al Bahar	Bloom
Año	1967	1976	1998	1998	2014	2018	1987	2012	2012
Función	Pabellón (museo)	Velódromo (biódromo)	Invernadero	Centro de conservación	Terminal aeroportuaria	Oficinas	Museo	Oficinas	Pabellón
Material	Acero	Concreto armado/acero	Acero y EFTE	Acero y vidrio	Acero y vidrio	Acero y vidrio	Acero y vidrio	Acero y PTFE	Acero y aleación
Sist. Constructivo	Barras y nodos	Trabes/Barras y nodos	Barras y nodos	Arcos hiperbólicos	Barras y nodos	Estr. Espacial	Marcos y losas	Marcos y losas	Barras
¿Mecanización?	No	No	No	Si, parcial	No	No	Si	Si	Si por PCM
Ventajas	Geometría resuelta por una geodésica, miembros de sistema constructivo iguales y modulares. Miembros componentes ligeros en escala y peso. Sin apoyos adicionales. Flexibilidad de uso al interior.	Una sola geometría y estructura para cubrir todo el claro en su totalidad. Aprovechamiento de la cubierta para soportar estructuras complementarias de uso a conveniencia en el proyecto. Flexibilidad de uso al interior.	Al ser geodésicas intersectadas pudo ser fácilmente modulado y cubierto. Evitar todo soporte adicional. Piezas de cubierta iguales.	Si los sistemas funcionan, permite albergar diferentes tipos de flora sin necesidad de dividir el espacio. La cubierta se encuentra por dentro de la estructura y es más accesible para su mantenimiento.	Los vanos y la geometría en general permiten que sea autoportante. Funciona por forma y no por masa. Reticular, replicable y modular. Columnas arbóreas integradas al proyecto. Flexibilidad de uso al interior.	Cobertura de vidrio separada de estructura para evitar fallos. Vidrio de cubierta plano. Piezas de la estructura modular. Hermeticidad.	Reacción individual de cada módulo. Protección de la piezas al interior por medio del control de la luz del sol. Mitigación de calor y aumento de temperatura según indique el proyecto.	Cada módulo reacciona individualmente. Todas las piezas son iguales en todos los niveles. Adaptación de los espacios interiores garantizada.	No requiere sistemas adicionales para funcionar. Paraboloides de igual dimensión y modulares. Peso nulo.
Desventajas	Al contar con la cubierta original de acrílico, imposibilidad de mantenimiento. Sin ella, nulo confort térmico o de alguna variable del exterior. Sólo utilizable como delimitante espacial.	Sistema constructivo con miembros de gran peralte y dimensión. Requerimiento necesario y continuo de medios mecánicos y activos para adaptación del interior a ecosistemas.	Comfort térmico medio, ya que al ser solo un material translúcido único no regula la entrada y salida de energía correctamente.	Sólo sistemas activos de mitigación de temperatura, luz y variables exteriores. De no funcionar estos, sólo efecto invernadero y poco confort al interior. Estructura más pesada debido a los requerimientos de su geometría.	Por la situación geográfica y climática, se apoya en sistemas activos de mitigación de calor y energía. Integración regular entre cubierta e interior, en un sentido de que podía resolverse con otros múltiples sistemas.	El equilibrio, entrada y salida de energía se da exclusivamente por medio mecánicos y eléctricos. Es decir, no hay sistemas pasivos de mitigación.	Por el número de piezas componentes del módulo diafragma y grado de mantenimiento, tendencia a fallar, como es su estado actual de desuso. Requerimiento adicional de estructura portante.	La posición de los módulos mecánicos representa esfuerzos adicionales a la estructura sin mezclarse directamente. Sólo adaptable a ese edificio.	Adaptabilidad sólo ante cambio de temperatura y no a otras variables. Nulo control manual ante algún inconveniente.

2.2 MATERIALES Y TECNOLOGÍAS EXISTENTES

Como se ha visto en los ejemplos anteriores, existe una tipología de materiales y sistemas constructivos en estructuras similares a la que será estudiada en este documento. Donde las cubiertas existentes se encuentran principalmente resueltas mediante un sistema de barras y nodos. Algunos ejemplos plantean el uso de estructuras espaciales, mientras que otros un sistema de gridshell. Así mismo, algunos utilizan nodos soldados fijos y otros ensamblados.

Adicionalmente, existe una tipología uniforme de materiales utilizados.

En todas las estructuras analizadas, las barras y nodos son realizadas en acero, y en la mayoría de los casos utilizan algún método para evitar la generación de óxido.

Por otro lado, los elementos que componen los paneles están principalmente resueltos con dos materiales distintos: cristales o plásticos. Esto, como se ha percibido, depende de la cantidad de luz y calor que se desea transmitir al interior de la cubierta.

Podría ser concluido que el seguimiento de un sistema constructivo y elección de materiales similares cumpliría con los requerimientos necesarios para la creación de una cubierta habitable.

Sin embargo, es importante notar que el proyecto propuesto busca explorar a fondo las posibilidades de optimización de esta tipología de edificios.

Por este motivo, en las siguientes páginas se expondrán algunas tecnologías y materiales recientemente estudiados que podrían incrementar las posibilidades de éxito del proyecto.

MATERIALES PARA ESTRUCTURAS DE BARRAS Y NODOS

Las estructuras de barras y nodos pueden ser resueltas con una diversidad de materiales. Los más conocidos son el acero, la madera y los plásticos.²⁴

MADERAS

La madera es un material altamente ligero debido a su porosidad, y con excelentes capacidades mecánicas a tracción. Con el objetivo de hacer más eficiente el trabajo de la madera, se han generado nuevos productos.

La madera laminada se ha convertido en un material popular que mejora las capacidades mecánicas de la madera, y que permite con ello su utilización en estructuras mayores y de formas más complejas.

Existen grupos de investigación que han explorado a mayor detalle las posibilidades de reducción del peso de una estructura de madera.

Se exploran la posibilidad de generar huecos dentro de vigas de madera e introducir tubos de PVC en ellos, o de PVC relleno de un material de cambio de fase.²⁵

Con este sistema, es posible reducir de forma considerable el peso de la madera debido a la extracción de material, y mejorar el comportamiento térmico de los elementos.

Para efectos de este proyecto, la madera, tras ser analizada a profundidad, probó no ser la elección óptima, debido a su capacidad de retención de humedad y de deterioro debido al medio ambiente.

PLÁSTICOS

Los plásticos, como ha sido mostrado por el Laboratorio de Estructuras Ligeras²⁶ de la Facultad de Arquitectura en la UNAM, son una excelente opción para la generación de barras ligeras y resistentes, y para el diseño de nodos versátiles.

El presente proyecto, sin embargo, busca reducir al máximo la posible huella ecológica producida por las edificaciones, por este motivo, el uso de plásticos ha sido descartado. Los plásticos, en su mayoría, provienen de un proceso de manufactura altamente contaminante, al ser derivados del petróleo.

Así mismo, aunque algunos de ellos pueden ser reutilizados, la mayoría no pueden ser fundidos para crear nuevos elementos constructivos. Adicionalmente, de no ser reciclados, su periodo de degradación natural es prolongado, y representan un peligro para animales hambrientos que pueden llegar a ingerirlos.

Mientras constantemente se busca la innovación en esta área mediante la generación de nuevos materiales plásticos mediante compuesto vegetales, hay aún un gran camino a recorrer en este ámbito.

METALES

Los metales son materiales altamente resistentes y de larga duración, con la posibilidad de ser fundidos para la generación de nuevos elementos o degradados a través del tiempo por el mismo medio ambiente.²⁷

Existen una diversidad de metales, sin embargo, el más común en la disciplina de las cubiertas es el acero, el cual consiste en aleaciones de hierro.

Al mismo tiempo, existen diversos tipos de aceros, cada uno generado con objetivos específicos.

Estos son clasificados de diferentes maneras por instituciones y normas diversas. Algunas de ellas son: ASTM, AISI, SAE, UNE, DIN, etc. Cada una de estas normas se enfoca en propiedades distintas, algunas clasifican de acuerdo con el uso del material, mientras otras se basan en los compuestos utilizados.²⁸

En ocasiones, es útil la combinación de nomenclatura de múltiples normas para obtener una mejor especificación del acero a utilizar.

MATERIALES PARA LA GENERACIÓN DE PANELES TRASLÚCIDOS

Al tratarse los paneles de elementos que deben permitir el paso de la luz, tenemos tres principales materiales utilizados para resolver esta problemática: Los plásticos, los cristales, y las resinas.

RESINAS

El primero de ellos son las resinas de origen natural. Aunque bien tienen una resistencia adecuada, son malas transmitiendo el calor. Además, su proceso de fabricación llega a ser lento, lo que las vuelve una opción inadecuada para proyectos de grandes claros.²⁹

POLÍMEROS

Como segunda opción encontramos los plásticos que se dividen principalmente en dos tipos:

- Policarbonato: Transmite la luz de 30 a 50 %, dependiendo de sus características. Existen paneles absorbentes y traslúcidos. Tiene mayor resistencia que el vidrio y puede ser traslúcido hasta en dos pulgadas de espesor.

Es completamente reciclable pero los claros deben ser menores debido a su deformación. Debe ser tratado contra la radiación UV debido a que la coloración tiende a perderse con el sol.³⁰

Sin embargo es práctico utilizarlo en ciudades por sus propiedades anticorrosivas. Resiste temperaturas de -40 hasta 138°C.

Mientras el policarbonato parece ser una opción adecuada, no es el material adecuado para usarse en una cubierta altamente expuesta al sol y la intemperie pues perdería sus cualidades estéticas.³¹

- Acrílico: Es un termoplástico que transmite luz hasta 92%. Es ligero pero sólo diecisiete veces más resistente que un vidrio convencional. Existen diversas clases de acrílicos, como lo son:

- Plexiglas: Utilizado en fachadas como sustituto de vidrio.

- UPM: Compuestos de plástico y madera. Realizados con desechos de celulosas.

- Politetrafluoroetileno: 1% el peso del vidrio. Usado para vidrios cortinas y puede ser decorado. Tiene una capacidad de esfuerzo a la tracción de hasta 500 000 psi (35 000 kg/cm²).

El plástico es un material adecuado para su utilización con acero. Sin embargo, el proceso de fabricación de los plásticos es más dañino para el ambiente que el de los vidrios y cristales, además los cristales poseen mayor capacidad de transmisión de calor y luz.

VIDRIOS

Los cristales a su vez se dividen en distintos tipos, siendo los más útiles para la tipología estructural estudiada los siguientes:

- Cristal aislante: Se compone de placas de vidrio separadas por un espacio de aire en el centro, este puede estar relleno con aire seco o algún gas como hexafluoruro, lo que ayuda a mejorar la eficiencia térmica.

- Cristal templado: Es de cuatro a cinco veces más resistente. Cuando se rompe lo hace de manera más uniforme y soporta cambios de temperatura. Además, es dúctil. Se crea mediante el calentamiento y enfriamiento rápido del mismo.

- Cristal laminado: Alternas hojas de vidrio y de algún polímero usando un adhesivo. Puede ser usado para dirigir la luz del sol, aislar luz y sonido. Permanece en su lugar incluso al ser roto. puede librar grandes claros. La ganancia de luz y calor variaría según la coloración de los cristales, y también según el nivel de aislamiento térmico de los mismos.

- Cristales cambiantes: Hoy en día existen además investigaciones sobre la posibilidad de generar vidrios que cambien no solo de opacidad, pero también de color según las condiciones solares y térmicas.

Los cristales, son una opción más amigable al medio ambiente que los plásticos y con un proceso de fabricación más optimizado que las resinas, sin embargo, es importante resaltar que cualquiera de los anteriores sistemas puede ser optimizado mediante el uso conjunto con materiales de cambio de fase, los cuales veremos a continuación.³²

TECNOLOGÍAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN

Durante los últimos años, la cantidad de tecnología disponible para la creación de arquitectura adaptable ha aumentado.

Los principales componentes en el desarrollo de estas soluciones son la creación de lenguajes de programación y software especializado, y la generación de nuevos componentes mecánicos.³³

En la realización de arquitectura adaptable, entran en juego elementos como sensores, sistemas con motores, tecnología inalámbrica e integración con software, estructuras

portantes, y desarrollo de software.

Mediante la automatización es posible controlar variantes como la cantidad de luz que traspasa al interior de una edificación, la cantidad de agua que ingresa, la reutilización de recursos, los niveles de oxigenación, el momento en que una luminaria debe ser encendida, e incluso el cambio de forma de una estructura.³⁴

SOFTWARE DESTACADO PARA LA AUTOMATIZACIÓN

Existen diversos softwares que permiten la realización de estudios mecánicos de elementos diseñados. Uno de los softwares de arquitectura que permite una fácil integración con sistemas mecánicos es Rhinoceros 3D.

Un programa de modelado 3D de formas libres con NURBS (Non-Uniform Rational B-spline) que permite modelar diseños preparados para renderizar, animación, bocetar, ingeniería, análisis y manufactura. Su más versátil componente, Grasshopper consiste en un editor algorítmico gráfico.

El programa se encuentra regido por uno de los lenguajes de programación más conocidos: Python. Es gracias a la integración de los anteriores componentes, que es posible simular el movimiento de objetos mecánicos de objetos arquitectónicos propuestos. Para ello, es necesario la integración de nuevos componentes, ya sean plugins como FireFly, controladores como Arduino y Raspberry, sensores, y actuadores.³⁵

ELEMENTOS COMPONENTES EN ESTRUCTURAS DE BARRAS Y NODOS

Por lo general éste tipo de sistema estructural se compone de barras, nodos y diagonales. Las barras suelen variar de acuerdo al claro a salvar y a la extensión total de la cubierta, así como del clima al cual estarán expuestas. Las diagonales normalmente se

encargan de rigidizar en un sentido cruzado de nodo a nodo el sistema con el fin de evitar desplazamientos indeseables por carga viva, muerta y más importante accidental. El material más común de éstas son cables de acero de diversos calibres y un alma central y torones enrollados helicoidalmente sobre ella.³⁶

Finalmente los nodos son el punto neurálgico e indispensable para lograr el equilibrio de todo el sistema ya que unifica todos los elementos que permitirán descargar correctamente el peso de la estructura al suelo.

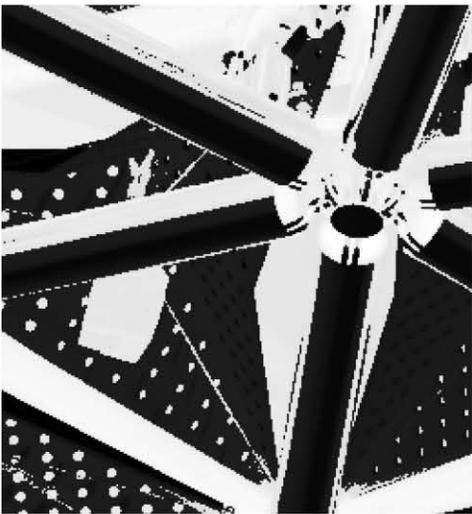
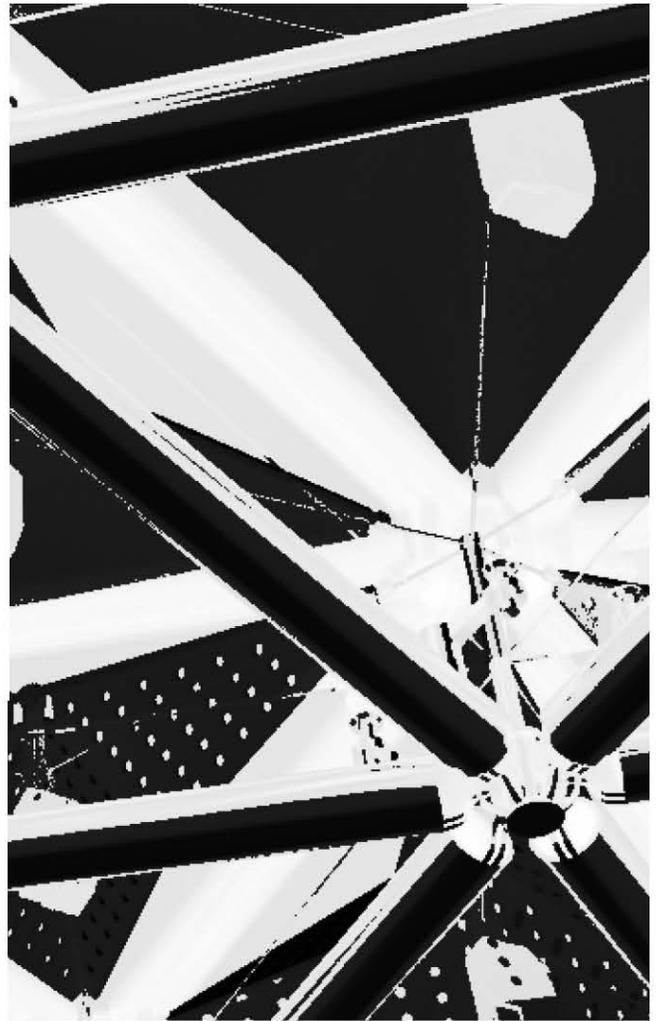
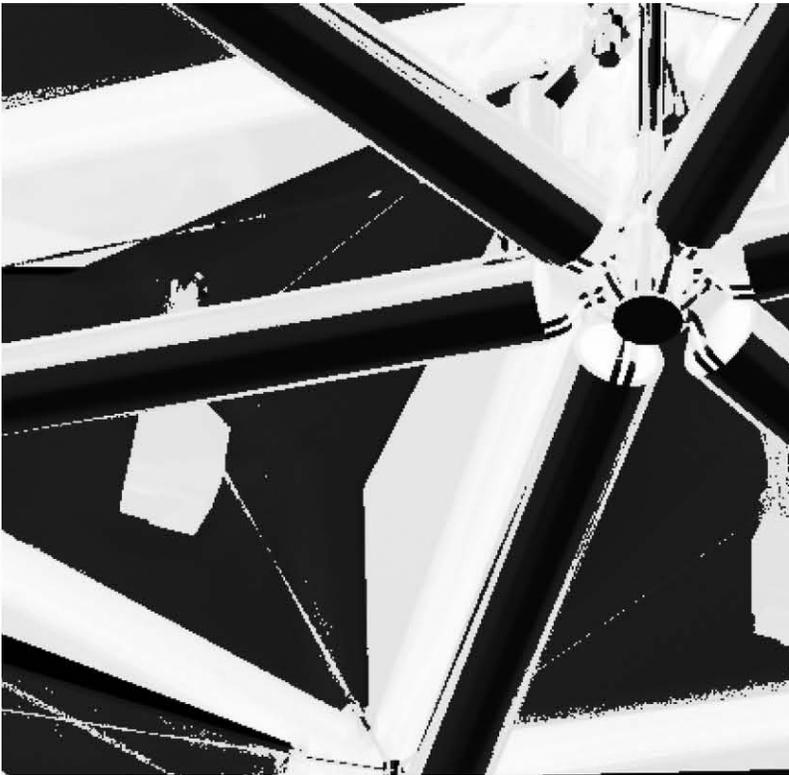
Existe una gran variedad de formas dependiendo de las necesidades del diseño a resolver. Para esta propuesta en particular se tomo como referencia mecánica - funcional el nodo desarrollado por el doctor Juan Gerardo Oliva Salinas, la doctora Magdalena Trujillo Barragán y el equipo del Laboratorio de Estructuras Ligeras de la UNAM.

Esto debido a que el nodo se origina de una geometría esférica, a partir de un centroide que permite medir y calcular distancias nodales constantes. Se compone de un cuerpo central rígido con canales para rotar a partir del centro hasta 4 orejas por medio de tornillos para recibir barras en distintos ángulos. Éste se constituye de Frianyl y formó parte de entre otros proyectos del *MODUNAM III*, pabellón participante del simposio de la *IASS 21* en Surrey, Inglaterra.



Nodo universal MODUNAM III : LEL UNAM, CDMX-Qro., México, 2021. Retomado de: Oliva, J. Trujillo, M. (2021). *Knots and bars kit to construct translation grid-shells. Abstract for IASS Annual Symposium, (-)*,

3. METODOLOGÍA Y PROCESO DE DISEÑO



El presente capítulo se encuentra dedicado a la explicación de la metodología utilizada para la elaboración de la propuesta de solución de la "Cubierta habitable adaptable ante condiciones climáticas cambiantes". Así mismo, se expondrán los motivos por los cuales, las siguientes herramientas fueron utilizadas, y la importancia de cada una de ellas para la realización de una cubierta congruente, estética, estructural, y térmicamente.

Las metodologías expuestas en este capítulo se enfocan en áreas como: solución mecánica-formal, simplificación de procesos de manufactura, corroboración del comportamiento estructural de la cubierta, y evaluación de comportamiento térmico de elementos.

3.1 PROYECTO CONCEPTUAL E INTENCIONES DE DISEÑO

Se propuso un espacio de refugio ante condiciones adversas del exterior. Si bien por su naturaleza y características puede servir para una variedad de usos, la función principal para la cual fue pensado es la de albergar un grupo de 48 personas por un espacio mínimo de 62 días con miras a extender la estadía en el mismo. El espacio debía estar preparado para que los usuarios en el interior pudieran subsistir sin tener contacto con el exterior, es decir, fuera de la cubierta habitable. Requiriendo espacios en donde se pudiera llevar a cabo la producción de suministros, su consumo y posterior reutilización y/o regeneración de dichos recursos.

Por lo que se pensó en la implementación de sistemas pasivos y activos de supervivencia dentro del conjunto tales como: Vivienda, almacenamiento de insumos, zonas de cultivo, espacios para de almacenamiento y distribución de energía, así como tratamiento de los desechos.

Se debió pensar en resolver el problema con una correcta distribución y funcionamiento de espacios habitables en conjunto con la implementación

de las herramientas, sistema constructivo y tecnologías descritas en el capítulo anterior.

Las premisas de diseño buscadas a estar presentes en el desarrollo de la propuesta fueron las de:

- Cubrir en su totalidad el espacio de manera continua con un sistema ligero capaz de librar un gran claro.
- Contar con espacios flexibles marcados por distintas alturas congruentes para ser habitados y utilizados según las necesidades de estos.
- Tener en alguno de los bordes un acceso único para mantener control y seguridad.
- Diseñar un borde con apoyos continuos con el fin de mantener la hermeticidad y facilitar que la integridad estructural en ellos sea constante y evitar deformaciones o esfuerzos indeseados en la cubierta.
- Aprovechar el agua y los recursos como elementos compositivos a la hora de distribuir espacios para su correcto aprovechamiento.
- Tener la posibilidad de agregar óculos o elementos de apoyo que bajen hasta el suelo con el fin de ayudar a restringir la altura de los espacios, así como también agregar a la propuesta espacios naturales de captación de agua pluvial para su posterior tratamiento y aprovechamiento.
- Contar con uno o varios sistemas adaptables activos o pasivos, mecánicos o preferentemente automatizados para mejorar las condiciones al interior de la cubierta.
- Pensar en el diseño del conjunto como un espacio arquitectónico con una forma y sistemas que la conforman: innovadoras, originales y atractivas.

3.2 BÚSQUEDA DE ÁREAS DE OPORTUNIDAD MEDIANTE EL DIAGRAMA FILOGENÉTICO

El diagrama filogenético en la arquitectura es una metodología utilizada originalmente por el despacho FOA (*Foreign Office Architects*). Consiste en la clasificación de edificaciones basada en similitudes y diferencias.

Originalmente, la generación de un diagrama de este tipo tenía como objetivo el proveer de identidad a un despacho, mostrando una clasificación que ilustra la toma de decisiones de los arquitectos basada en el uso del diagrama. Esta misma metodología puede ser aplicada a la búsqueda de áreas de oportunidad para nuevos proyectos, ya que permite vislumbrar de forma clara las áreas en las cuales un proyecto debe ser similar a otro por su propio beneficio, las áreas en las que debe evitar soluciones pasadas, y las áreas que no han sido exploradas.

Para realización de un diagrama filogenético que permitiera una mejor toma de decisiones para el diseño de la "Cubierta habitable adaptable ante condiciones ambientales cambiantes" se definieron 8 temas vitales a considerar como ramas principales del diagrama: Función, tipología, geometría, superficie, clima, aislamiento, sistema constructivo, y material. Cada una de estas fue subdividida en variables más específicas, llevando esta subdivisión a cinco niveles más. Posteriormente se definió una simbología para la realización de correcciones, líneas sólidas para relaciones lineales y líneas punteadas para relaciones cruzadas, con el fin de facilitar la lectura del diagrama generado. (Fig. 1, pág. 31)

Finalmente, para una mejor visualización y síntesis de la información arrojada por los cruces de las relaciones se optó por realizar un diagrama tridimensional en vez de bidimensional.

El diagrama consiste en esferas (variables) que son ordenadas conforme a capas y secciones dependiendo su rama y nivel de particularidad. Las esferas aumentan de tamaño al acercarse al centro del diagrama entre menos específica es su particularidad. (Fig. 2, pág. 31)

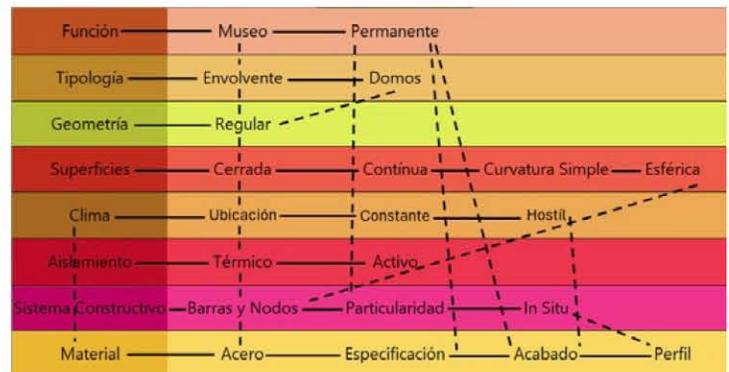
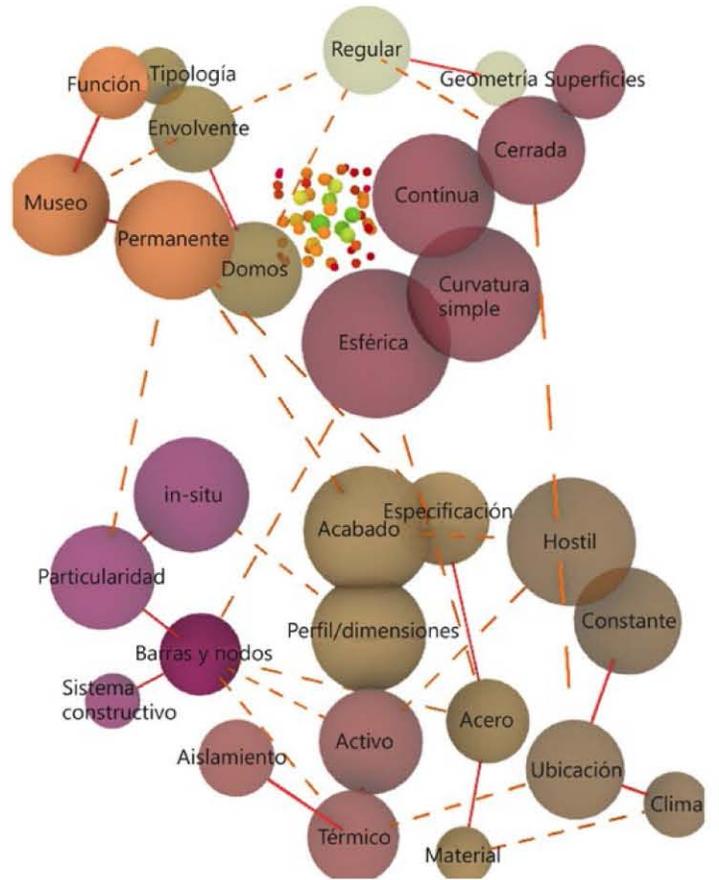
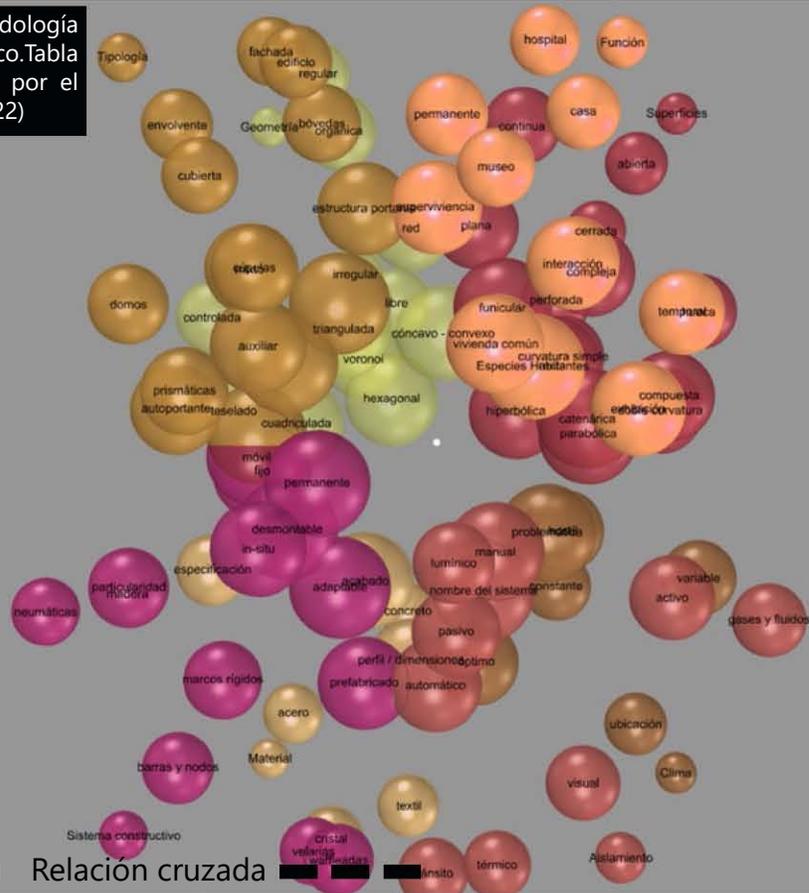


Figura 1: Ejemplo sintetizado de diagrama filogenético. En donde, se engloban los 8 grupos mencionados y sólo aparecen las variables propias de un proyecto. Las líneas continuas indican una relación entre variables del mismo grupo y las punteadas indican relaciones entre variables afectadas una por otra. Propia. (2022)

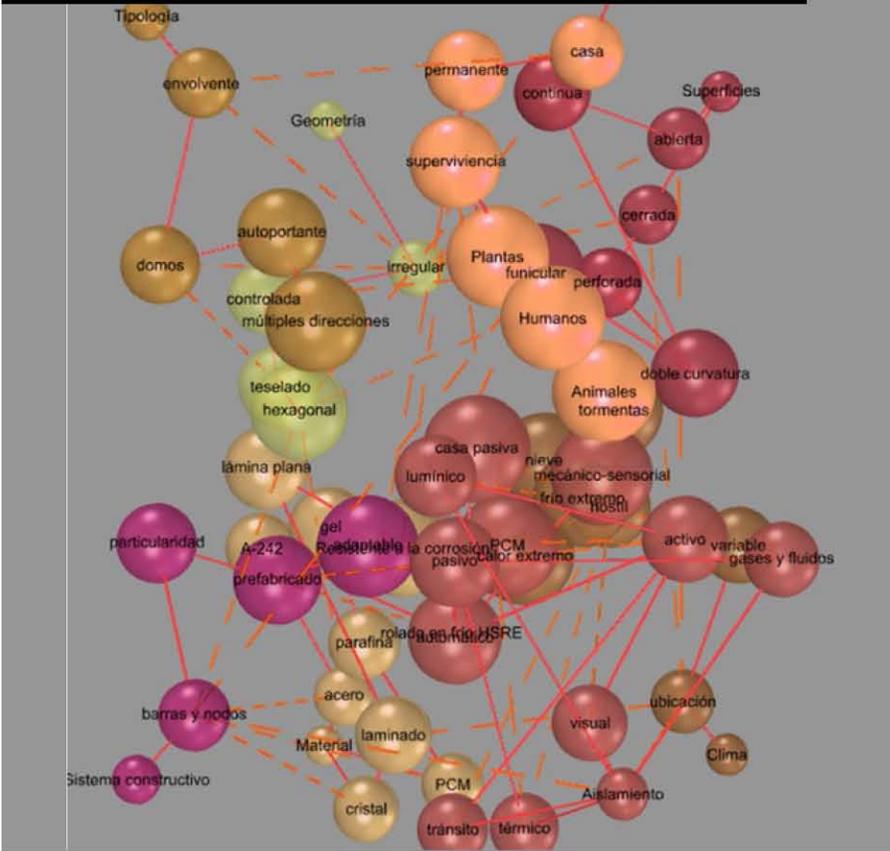
3. METODOLOGÍA Y PROCESO DE DISEÑO

Figura 2: Definición de metodología esferas por diagrama filogenético. Tabla 1: Parámetros totales a evaluar por el análisis de proyectos. Propias. (2022)



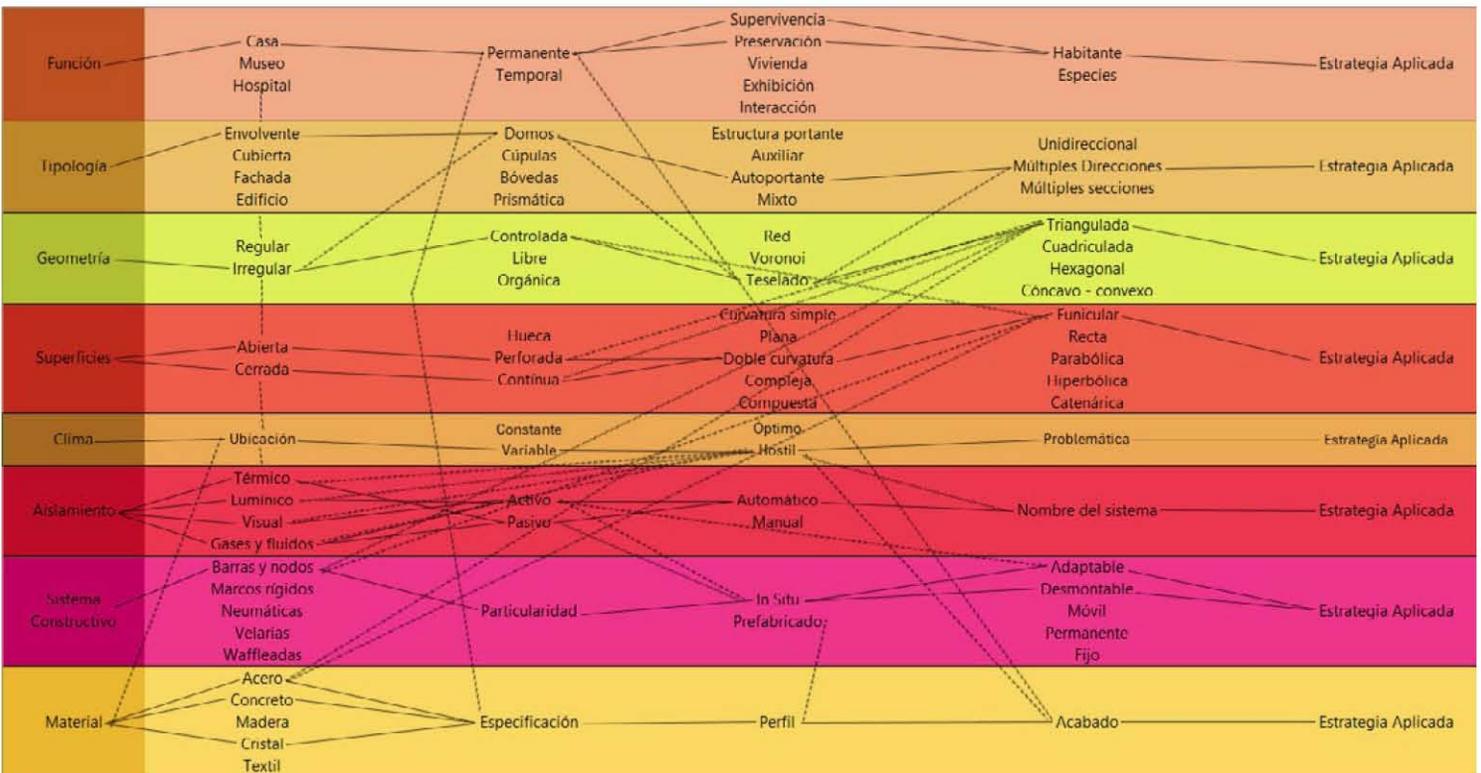
Función	Casa Museo Hospital	Permanente Temporal	Supervivencia Preservación Vivienda Exhibición Interacción	Habitante Especies	Estrategia Aplicada
Tipología	Envolvente Cubierta Fachada Edificio	Domos Cúpulas Bóvedas Prismática	Estructura portante Auxiliar Autoportante Mixto	Unidireccional Múltiples Direcciones Múltiples secciones	Estrategia Aplicada
Geometría	Regular Irregular	Controlada Libre Orgánica	Red Voronoi Teselado	Triangulada Cuadriculada Hexagonal Cónvexo - cóncavo	Estrategia Aplicada
Superficies	Abierta Cerrada	Hueca Perforada Continua	Curvatura simple Plana Doble curvatura Compleja Compuesta	Funicular Recta Parabólica Hiperbólica Catenárica	Estrategia Aplicada
Clima	Ubicación	Constante Variable	Óptimo Hostil	Problemática	Estrategia Aplicada
Aislamiento	Térmico Luminico Visual Gases y fluidos	Activo Pasivo	Automático Manual	Nombre del sistema	Estrategia Aplicada
Sistema Constructivo	Barras y nodos Marcos rígidos Neumáticas Velarias Waffleadas	Particularidad	In 'situ Prefabricado	Adaptable Desmontable Móvil Permanente Fijo	Estrategia Aplicada
Material	Acero Concreto Madera Cristal Textil	Especificación	Perfil	Acabado	Estrategia Aplicada

Figura 3 y Tabla 3: Diagrama filogenético final del proyecto. Propias. (2022)



De la misma manera, se procedió a la evaluación de posibles diagramas para la “Cubierta habitable adaptable ante condiciones ambientales cambiantes”, evaluando posibles variantes de esta, y las cualidades que estas variantes modifican.

Se seleccionó a continuación el diagrama con cualidades más favorables, tomando este como punto de partida para la definición de las características de la propuesta a desarrollar. (Fig. 3, pág. 33).



Para una mejor visualización los diagramas desarrollados más importantes se colocaron lado a lado, permitiendo observar las diferencias diagramáticas entre ellos y la forma en la cual estas diferencias modifican el resultado formal. (Fig. 4, págs. 34-35).

Como conclusión de este proceso de diagramación, se obtuvieron algunas premisas importantes a seguir en la realización del proyecto:

- Las estructuras de gridshell son la solución más acertada para la realización de una cubierta que regule las condiciones climáticas interiores.
 - El uso de cristales como paneles es predominante en climas cálidos que buscan generar frescura. El uso de plásticos como paneles es predominante en lugares fríos que buscan generar calor.
 - La mayoría de edificaciones con funciones parecidas siguen una geometría que puede ser realizada de forma análoga, ninguna de ellas utiliza un proceso de form-finding para la obtención de la geometría final. Esto puede ser considerado como un área de oportunidad.
 - El uso de materiales de cambio de fase para la generación de paneles térmicos es poco explorado. Esto representa una segunda área de oportunidad.
 - El uso de una cubierta responsiva mecánicamente puede ser un factor relevante en la eficiencia energética de una edificación. Una vez obtenidas las siguientes conclusiones, es posible vislumbrar la relevancia de las áreas a solucionar de forma prioritaria en este proyecto:
 - Optimización de forma.
 - Propuesta de sistema constructivo apto para geometrías complejas.
 - Propuesta de automatización para la regulación lumínica y ventilación.
 - Propuesta de sistema térmico pasivo mediante materiales de cambio de fase.
- Los cuatro elementos antes descritos, su proceso de realización y solución, serán expuestos en los siguientes capítulos.

Proyecto Eden Grimshaw + MERO

Análogo de comparación

**Cubierta habitable adaptable
ante condiciones ambientales
cambiantes**

Variante: Geometría regular

**Cubierta habitable adaptable
ante condiciones ambientales
cambiantes**

Variante: Teselación hexagonal

**Cubierta habitable adaptable
ante condiciones ambientales
cambiantes**

**Variante: Geometría irregular +
teselación triangular**

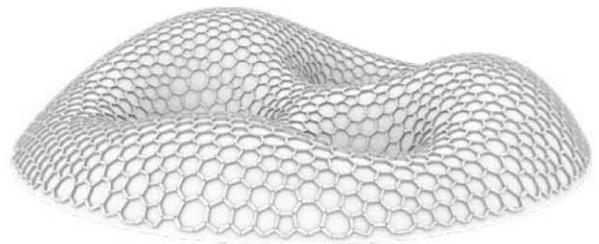
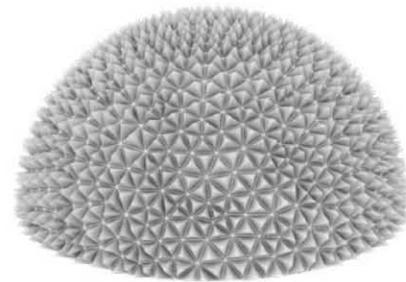
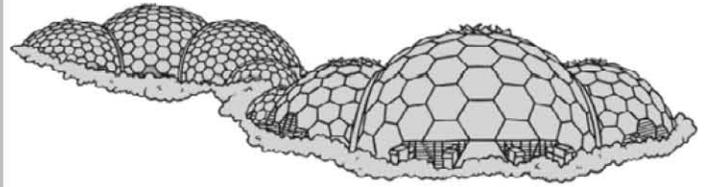
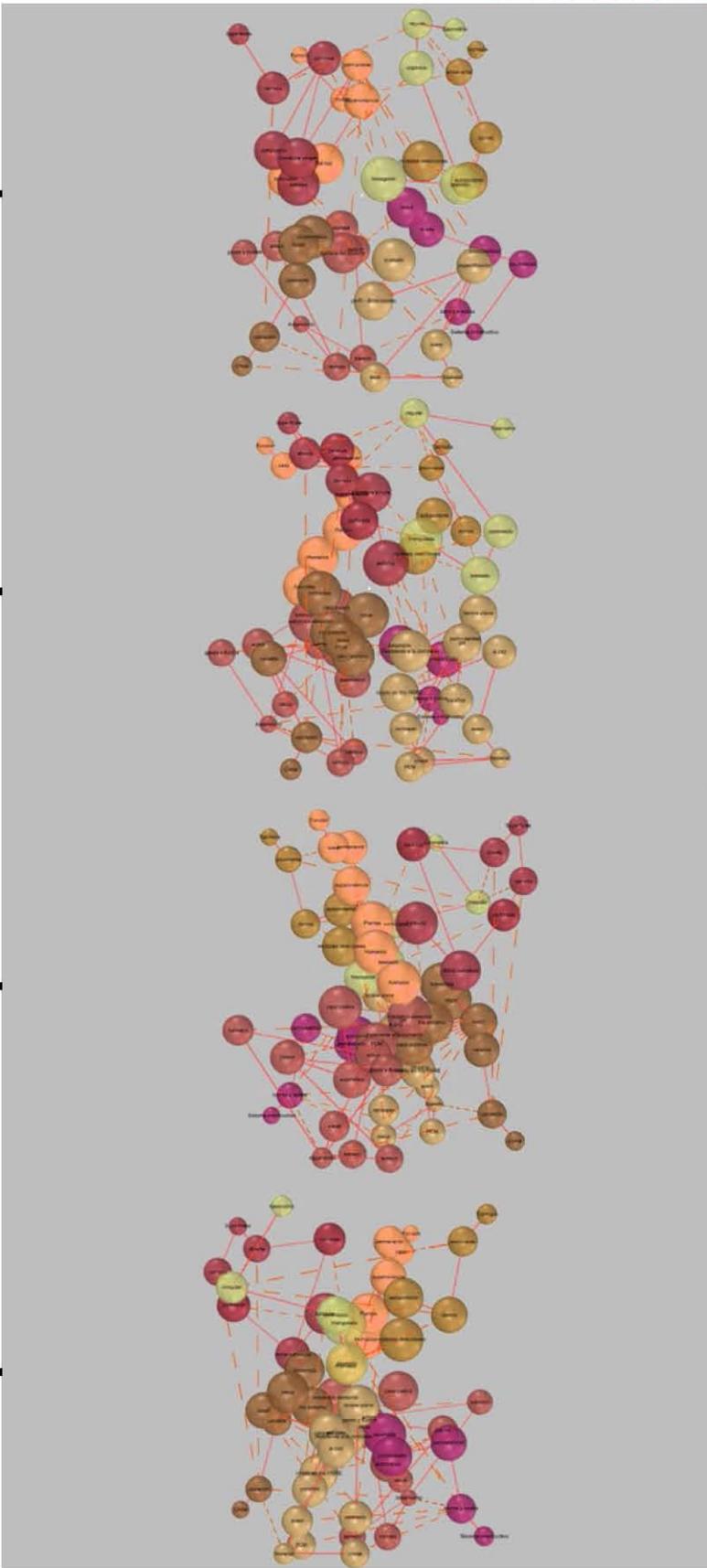


Figura 4: Comparativa de diagramas filogenéticos. Propia. (2022) y figura editada retomada de: <https://hanglooseadventure.com/eden/visit-us/eden-project/> (2022)

3.3 BÚSQUEDA DE FORMA MEDIANTE RHINOVAULT 2

La herramienta utilizada para este proyecto fue la de *RhinoVAULT 2*, la cual corresponde a una mejora de su predecesor *RhinoVAULT* del 2016.

El *plug-in* provee de un método intuitivo y rápido de generación de la forma en estructuras funiculares. utilizando diagramas recíprocos adopta las mismas ventajas de técnicas como la estática gráfica, pero ofreciendo una extensión viable para problemas de corte tridimensional.³⁷

Es importante mencionar que este programa es sólo de *Form-Finding*, es decir, ayuda a encontrar una forma óptima para trabajo a compresión, sin embargo, esto solo se puede lograr al utilizar un sistema estructural y constructivo congruente en todos los elementos que lo componen.

Se trata de un complemento del software de diseño asistido por computadora *Rhinoceros 3D* desarrollado en la ETH de Zúrich en la división *Block Research Group* por el doctor Matthias Rippmann, el doctor Lorenz Lachauer y el prof. doctor Philippe Block. *RhinoVault* se basa en el *Thrust Network Analysis* (TNA), la cual es una metodología de generar superficies que trabajan a compresión pura desarrollado por el Prof. doctor Philippe Block y el prof. John Ochsendorf.

El método se encarga de encontrar posibles soluciones funiculares bajo carga gravitacional con una envolvente definida por el usuario. Ofrece a través de estática gráfica resolver problemas espaciales en tres dimensiones.

El programa computa e itera valores de dos diagramas para lograr el equilibrio de una geometría final espacial.

Estos son los diagramas de forma y de fuerza que tienen una relación recíproca, es decir, que contienen un mismo número de líneas, corresponden a dos figuras paralelas y donde en un diagrama corresponde un punto con sus miembros o barras en el otro corresponde a un polígono y viceversa.³⁸ (Fig. 5, pág. 36)

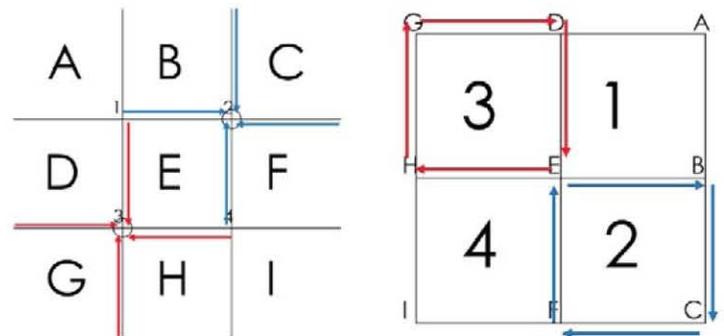


Figura 5: Diagramas recíprocos, izquierda nodos y derecho barras que forman el polígono. Propia. (2020)

A diferencia de su antecesor, *RhinoVAULT 2* tiene la característica de trabajar la generación de los diagramas recíprocos por medio de geometrías de entrada como lo son: Líneas, mallas, superficies, esqueleto de líneas y triangulaciones de curvas de borde.

Esto resultó muy conveniente, debido a que la manera de desarrollar una serie de soluciones del espacio de gran claro fue a partir de un programa arquitectónico con ciertas solicitantes de áreas específicas, el cual será desglosado a detalle en el capítulo 4.2, mas adelante en este documento.

Es así que a raíz de realizar el estudio de áreas y atendiendo los conceptos y premisas de diseño a respetar, se exploraron diversas disposiciones en planta, con apoyos diferente dimensión. (Fig. 6, pág. 37). Dichos apoyos debían ser continuos sin aperturas con el fin de respetar la propiedad de hermeticidad y cobertura del interior hacia el exterior del espacio.

Finalmente, se decidió la utilización de una planta irregular constuida a partir de la intersección de

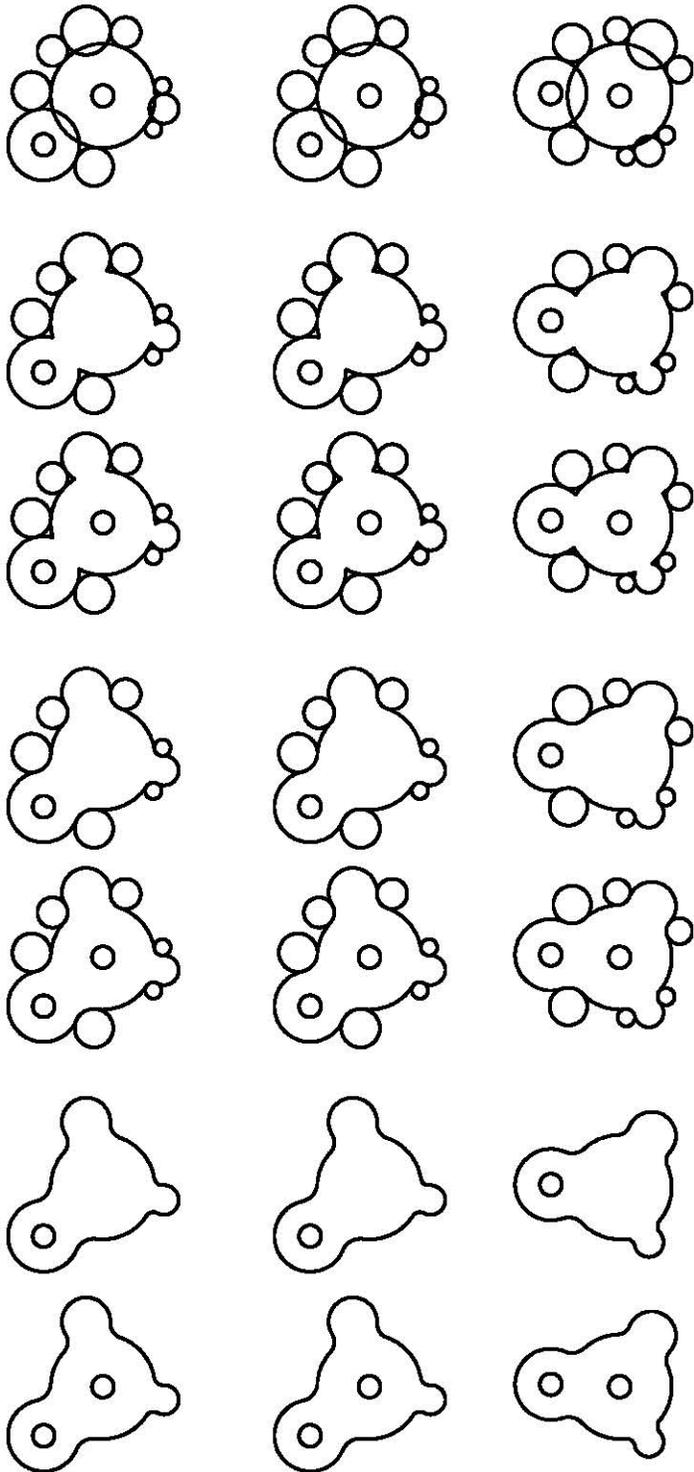


Figura 6: Estudios de generación de planta por medio de intersección y adición de circunferencias. Propia. (2023)

3 circunferencias de distinto radio de acuerdo a las necesidades espaciales a albergar dentro de ellos. Para la obtención de la solución final se siguieron los siguientes pasos:

1. Se generó una superficie coplanar al eje "X"- "Y", a partir de las tres circunferencias definidas. Seguido de una malla con bordes reparados para garantizar continuidad. Así como una subdivisión elevada para obtener curvaturas suaves. (Fig. 7, pág. 37)

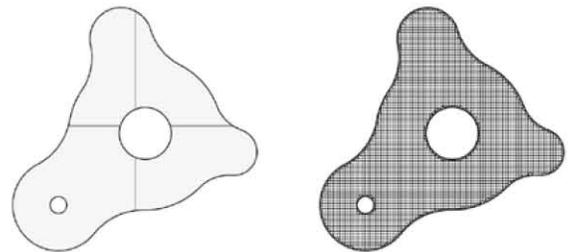


Figura 7: Superficie y malla coplanares base. Propia. (2023)

- 1.
2. Se solicitó acceso al servidor y adjunta la malla antes creada.
3. Se determinaron las condiciones de borde para los diagramas, los cuales incluyeron dos circunferencias dentro de la malla con el fin de generar otro tipo de espacios alrededor de las mismas y atraer la geometría para moderar su altura.
4. Se generaron los diagramas recíprocos de forma y fuerza con ángulos de desviación mínimos (<5%). Ello para lograr el equilibrio horizontal de los ejes "X" y "Y" fuera resuelto con pocas iteraciones. (Fig. 8, pág. 38)
5. Se realizó el equilibrio vertical del eje "Z", revisando una flecha máxima de 11.50 m, lo cual permitió, después de varias iteraciones y pruebas, arrojará áreas con la suficiente altura habitable y transitable.
6. Se obtuvo el diagrama de empuje con la geometría deseada con valles y crestas de diferente flecha para otorgar cualidades espaciales al proyecto. (Fig. 9, pág. 38)
7. Se visualizó una propuesta formal en 3D. (Fig. 10, pág. 39)

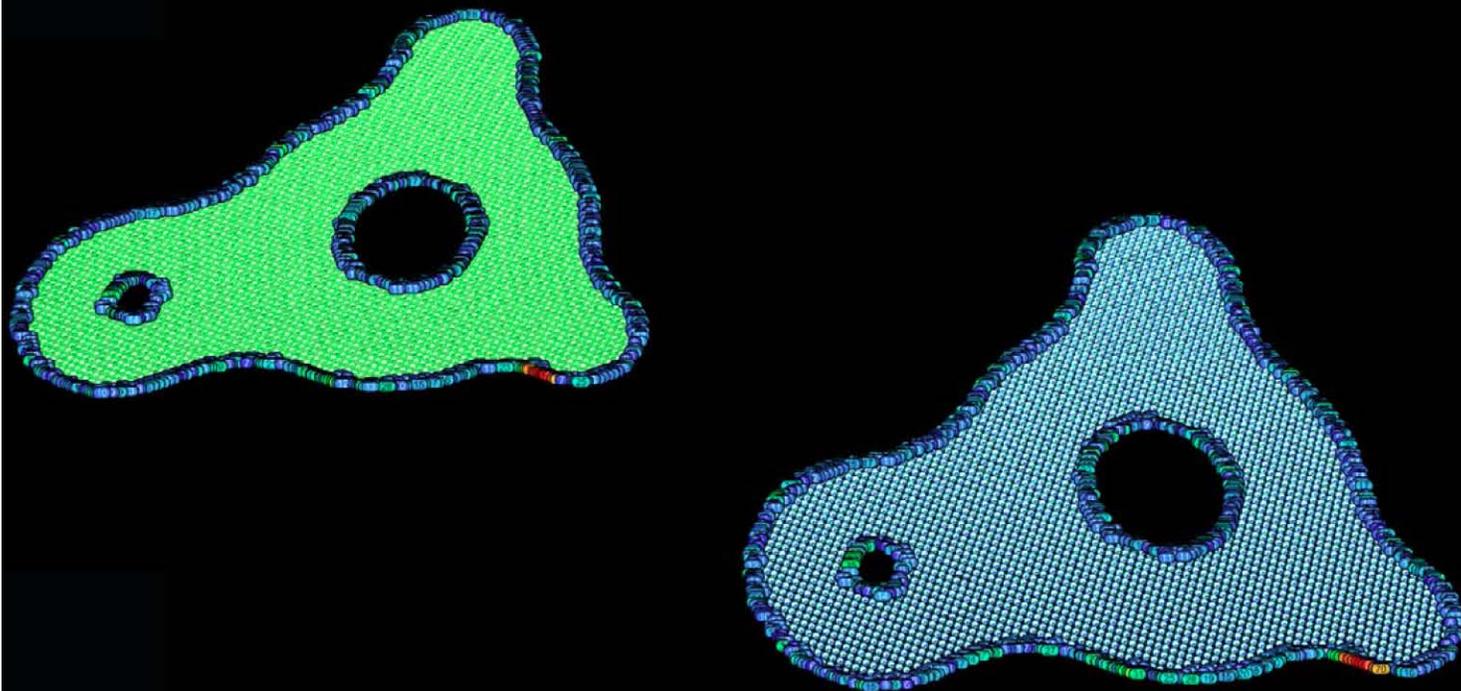


Figura 8: Diagramas recíprocos de forma y de fuerza. Propia. (2023)

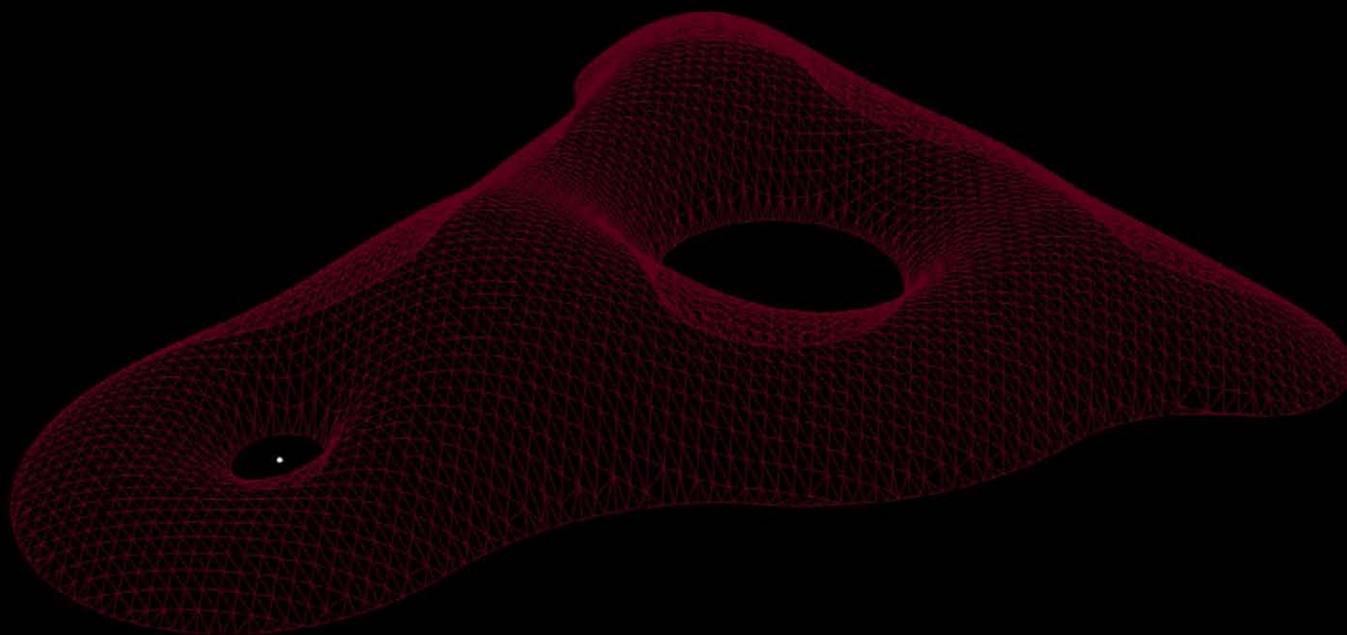


Figura 9: Diagrama de empuje en el eje "z". Propia. (2023)

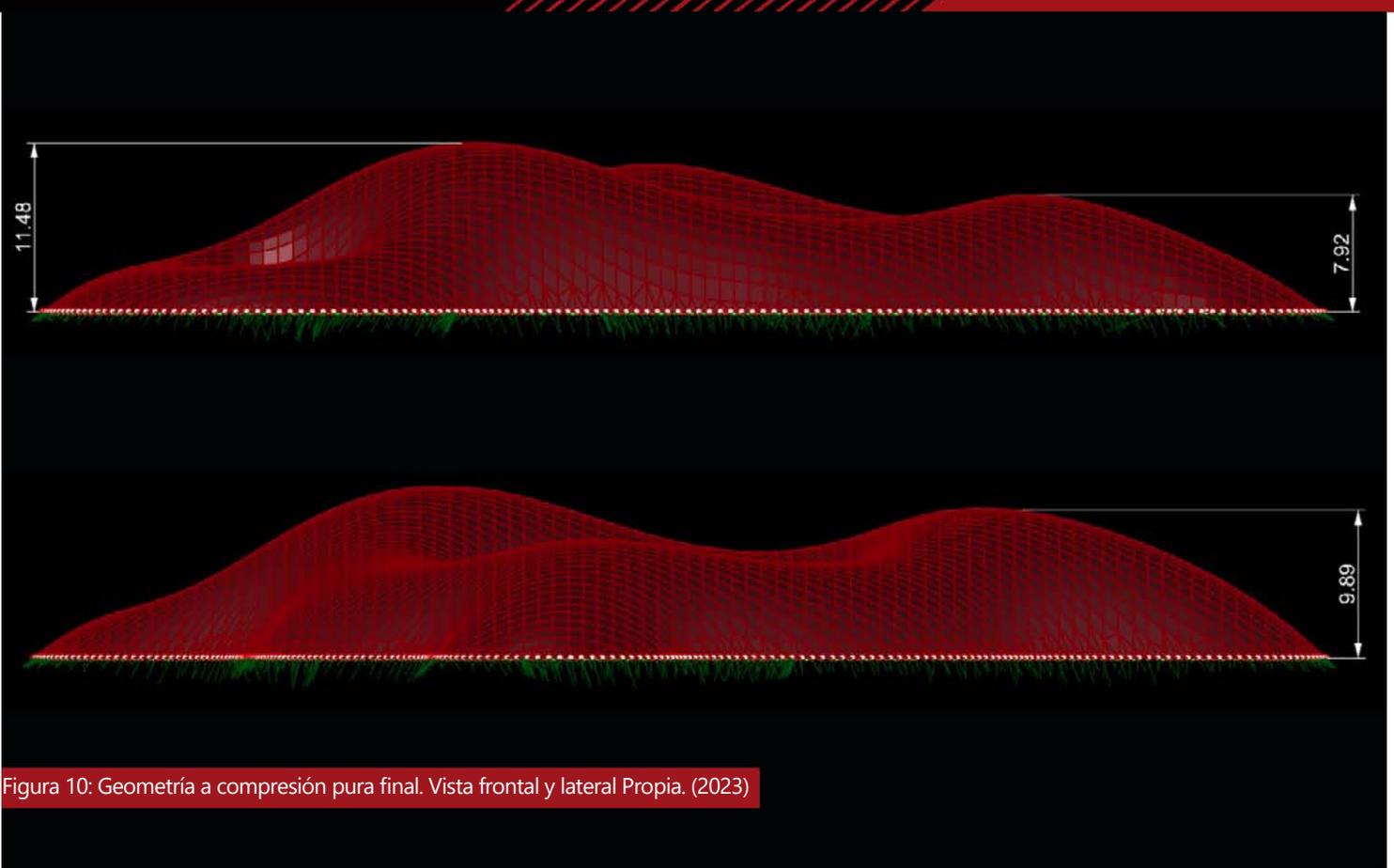


Figura 10: Geometría a compresión pura final. Vista frontal y lateral Propia. (2023)

3.4 TESELACIÓN MEDIANTE KANGAROO PHYSICS - MESHMACHINE

Una vez concluida la utilización de *RhinoVAULT 2* y obtenida la geometría base deseada, se procedió a la adaptación progresiva de la forma a una propuesta arquitectónica y estructural viable.

Se inició por buscar una teselación para las caras componentes de la superficie mediante el uso de prismas triangulares, los cuales garantizan la resolución de la cubierta mediante paneles coplanares. La distancia nodal elegida fue de 0.90 m, la cual es una dimensión de manejo comercial y no requiere adiciones o un proceso más elaborado de fabricación en general.

La subdivisión obtenida por *RhinoVAULT 2* se compone de triángulos rectángulos diversos poco prácticos para los fines de la cubierta.

Para resolver dicha problemática, se recurrió al uso de un plug-in adicional, *Kangaroo Physics* con el componente particular de *MESHMACHINE*. *Kangaroo Physics* es un motor de físicas para una simulación interactiva, form-finding, optimización y resolución de restricciones.^{xx}

Dentro de todas las herramientas que provee el plug-in se encuentra la de *MESHMACHINE*, la cual es la respuesta para solucionar un re-entramado de una malla. Contiene variables a ser controladas por el usuario en temas de preservación de la geometría, adaptabilidad a la curvatura y superficies mínimas.

Las operaciones que la herramienta realiza para llevar a cabo la adaptación y acercamiento al re-entramado dinámico son por medio de interacciones locales, es decir que reconfiguran sus conexiones a medida que la geometría cambia.³⁹

Realiza progresivamente y de forma repetitiva 3 operaciones esenciales (fig. 11, pág. 40):

- Giro de la arista, en donde un borde de la malla se rota para encontrar vértices contiguos.
- Colapso de arista, desaparece un borde completo y el resto de aristas contiguas se encuentran en una nueva arista común.
- Adición de arista/vértice, se agrega un nuevo miembro para subdividir más según convenga.

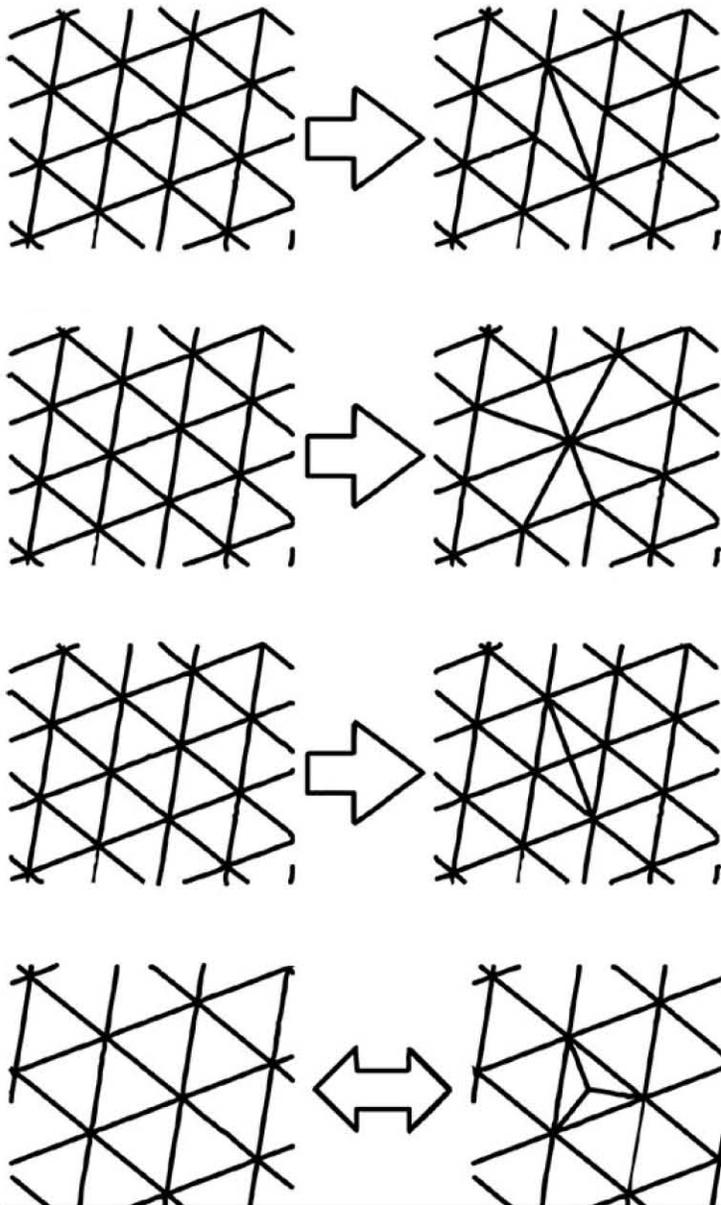


Figura 11: Operaciones de triangulación de malla. (2012) [Ilustración] Recuperado de <https://spacesymmetrystructu12re.wordpress.com/2012/09/20/meshmash/>

Se procedió a dividir en caras individuales la malla procedente de *RhinoVAULT 2*. Las variables de entrada para el componente de *MESHMACHINE* fueron la distancia nodal (0.90 m), adaptabilidad a curvatura (0, es decir con tolerancia mínima para no perder la geometría procedente del paso anterior e iteraciones (10, el número de ocasiones que realizas 3 operaciones antes descritas por cada arista de la malla). (Fig. 12, pág. 40) Los triángulos generados no necesariamente siguen un eje de emplazamiento similar, lo que evita la posibilidad de tener una estructura con arcos o similares a lo largo de la cubierta, pero facilita la utilización de componentes modulares de barras, nodos y paneles. (Fig. 13, pág. 41)

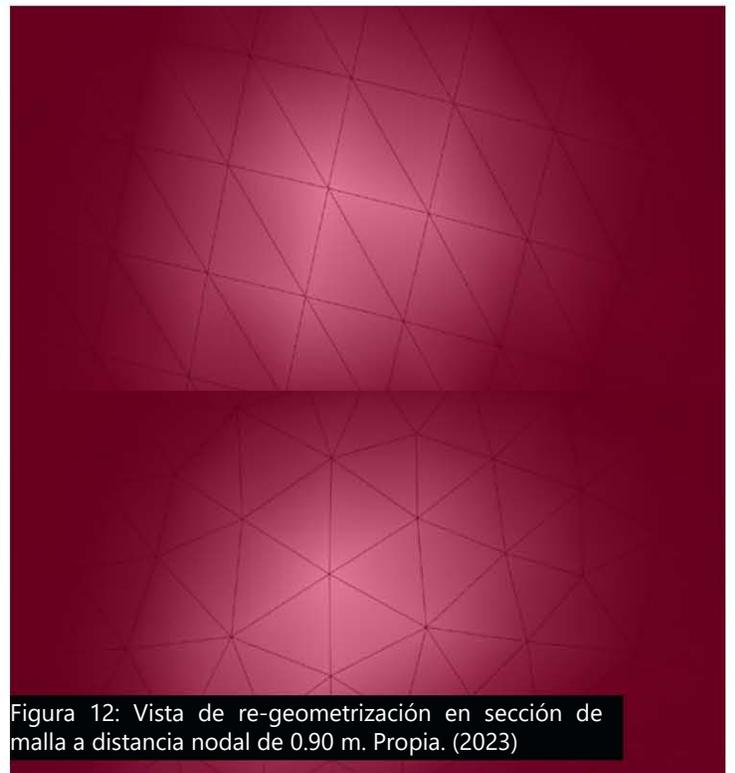


Figura 12: Vista de re-geometrización en sección de malla a distancia nodal de 0.90 m. Propia. (2023)

Se evaluaron las dimensiones de las aristas que componen la malla después de pasar por el componente. Arrojó que de 17,208 miembros, 11,409 corresponden a la distancia nodal deseada, es decir, 66.30 % de las barras resultan iguales a 0.90 m. Esta diferencia se presenta cercana o directamente en las condiciones de borde y se decidió avanzara la siguiente fase.

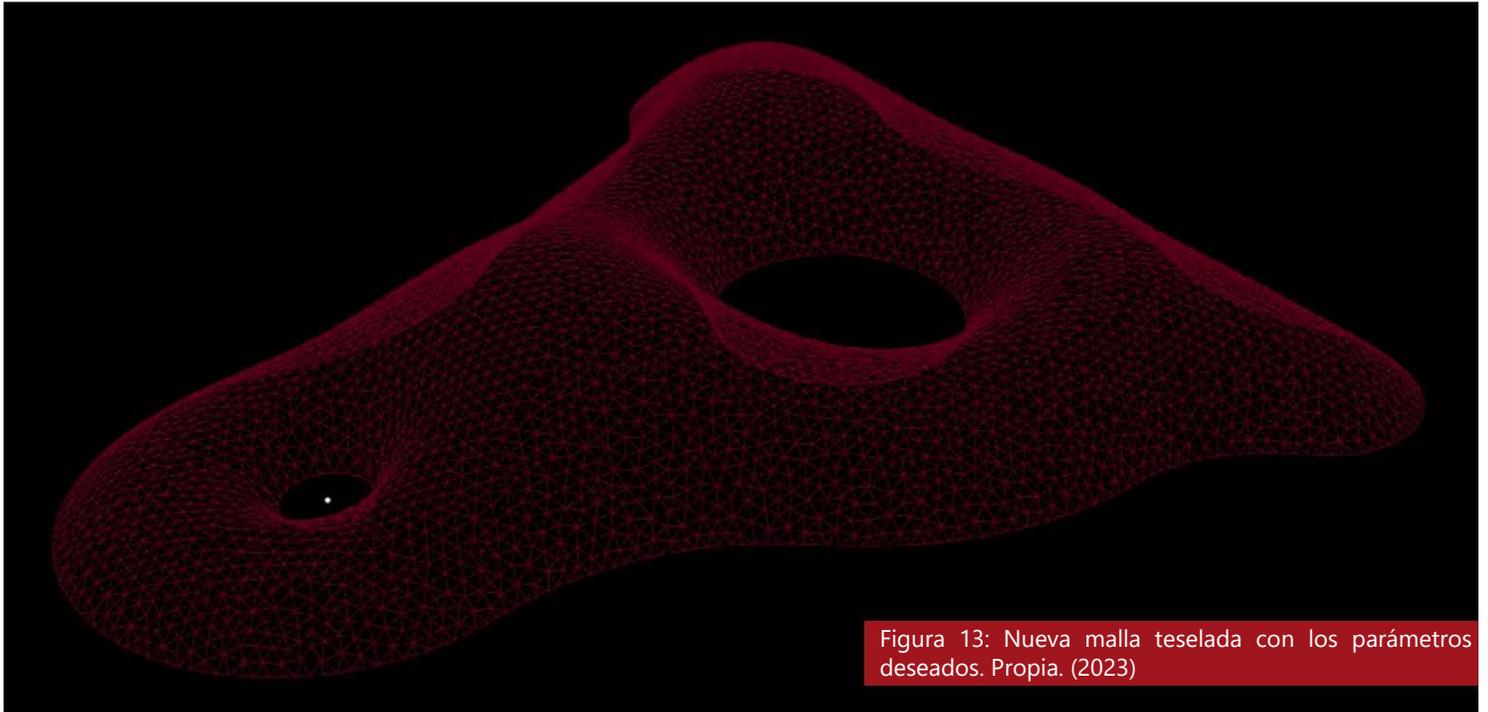


Figura 13: Nueva malla teselada con los parámetros deseados. Propia. (2023)

3.5 PROPUESTA DE ESTRUCTURA PORTANTE (GRIDSHELL)

Para determinar el sistema constructivo y sus componentes, los procesos del presente capítulo se llevaron a cabo a la par de acciones descritas en las secciones 3.6 *Experimentación y análisis de estrategias mecánicas adaptables mediante Rhinoceros, Grasshopper, Firefly y Arduino* así como 3.7 *Análisis mecánico-formal mediante Karamba 3D*. Ello debido a que la naturaleza del proyecto demandó un proceso no lineal de diseño y desarrollo para obtener un resultado congruente.

Siendo así, se propuso un sistema de barras y nodos con una primera intención de poderse resolver con perfiles OC de acero en consonancia de la distancia nodal y su modulación definida en un paso anterior.

Para visualizar y poder modificar en tiempo real las dimensiones de los miembros en un principio de forma conceptual, se conectó dentro de *Grasshopper* la malla triangulada a componentes capaces de otorgarle condiciones de volumen y espesor a los vértices y aristas.

La definición completa de *Grasshopper* con la que se resolvió la geometría se encuentra en la sección de *Anexos parte 1*.

Es importante destacar que el proyecto tuvo que ser dividido en capas a diferente paño, es decir se comprendió que una de ellas era la estructura portante que está comprendida por las barras y nodos, la siguiente por una cubierta capaz de proteger la estructura y finalmente uno o varios elementos que componen la estrategia mecánica adaptable.

Se procedió a programar la definición tal que se pudieran visualizar barras y nodos a este punto, conceptuales, en donde sus dimensiones y escala permitieran dar apoyo el proceso de diseño y concepción de elementos estructurales más adelante. Se logró por medio de extrusiones cilíndricas o pipas y esferas. (Fig. 14, pág. 42) A la par de esta definición, como ya se ha mencionado, se revisó con el simulador *Karamba 3D* un ancho congruente de barra de acero el cual estará detallado en dicho capítulo, de 10 cm de diámetro y un nodo inscrito en 10 cm de diámetro.

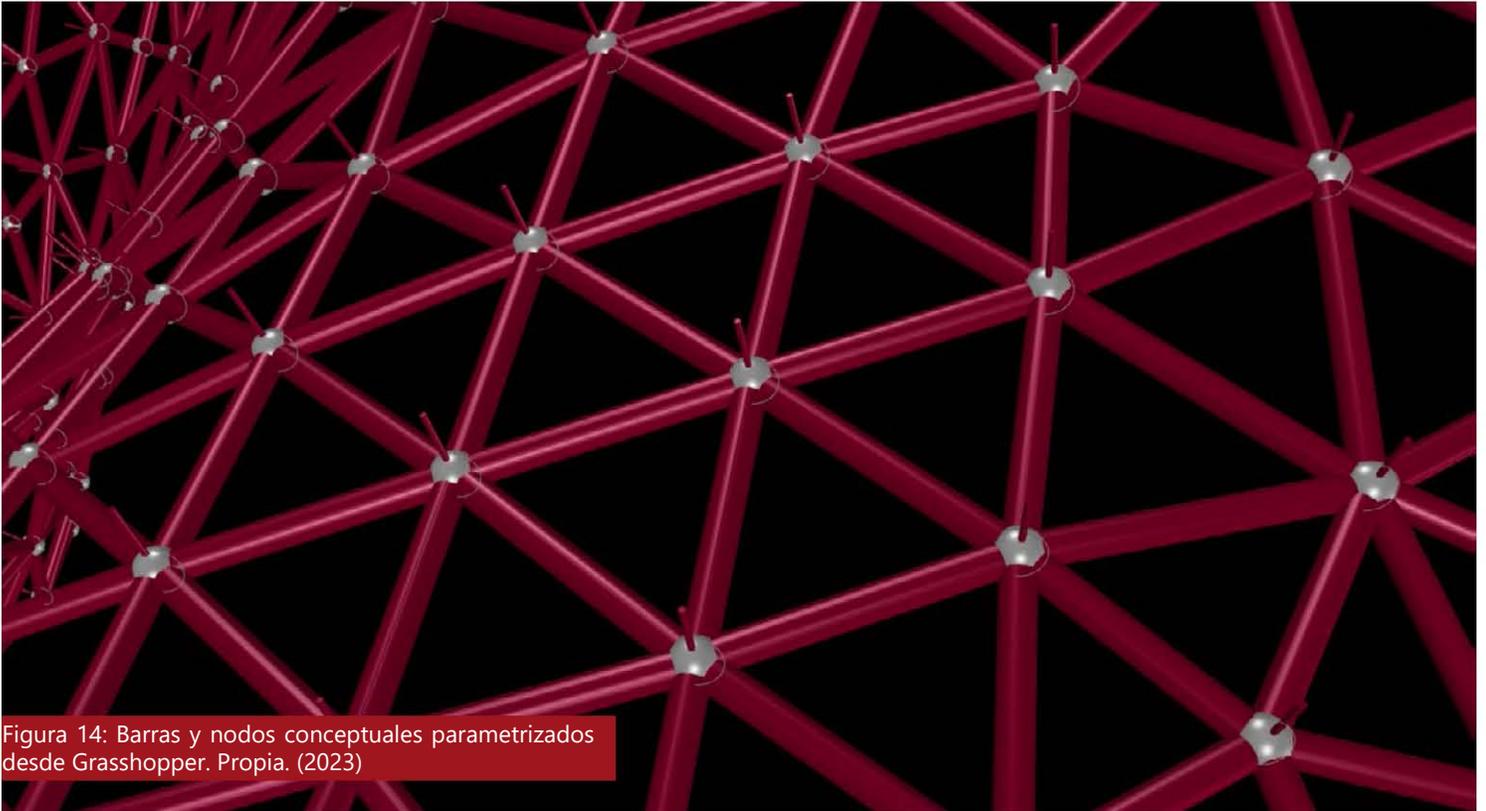


Figura 14: Barras y nodos conceptuales parametrizados desde Grasshopper. Propia. (2023)

Estando de acuerdo con a la información que confirmaba la dimensión propuesta de barras, así como el tipo de acero a utilizarse. Se parametrizaron los valores escala de los miembros para estar preparados para una eventual modificación al agregarse los módulos mecánicos adaptables.

Como siguiente paso, se llevo a cabo el desarrollo de la propuesta del nodo. El cual, debía poderser universal en para poder recibir en un mismo punto de 1 hasta 7 barras, ser capaz de soportar a estructura portante de la cubierta así como los módulos mecánicos adaptables.

Al tener una superficie compleja anti-funicular con variaciones de ángulos entre cada miembro que la compone, el nodo debía poseer características que le permitieran permitir rotación horizontal concéntrica para adaptarse a las barras en múltiples direcciones. Así como una rotación vertical concéntrica, debido a que cada nodo posee una normal diferente al resto. (Fig. 15, pág. 43)

Se propuso que la fabricación del nodo esté compuesta por (Fig. 16, pág. 43):

- Sólido liso redondo de acero, los cuales se deben devastar vía fresadora CNC con broca de $\frac{3}{16}$ y a una profundidad de 5.49 mm, con el fin de ser capaz de evitar desplazamiento de aletas en conjunto con el tubo OC circular.
- Tubo de acero circular OC de 1 1/2" (48 x 5.08 mm) de acero, con el fin de articular y sujetar concéntricamente aletas.
- Aletas de placa de acero calibre 6 (4.39 mm), las cuales su geometría se generó a partir de un arco de circunferencia con el mismo paño de la esfera conceptual antes descrita. Con suajes realizados vía corte láser de alte precisión para aperturas para ser sujetado al OC arriba descrito y para recibir la oreja de barra.

El ángulo para la apertura del suaje se evaluó con respecto a el caso más crítico de barra presente en la cubierta el cual es de 39.47° con respecto a la posición normal de un nodo. Finalmente, esta apertura llega sobradamente a los 43.07° , es decir, un total de 86.14° . (Fig. 17, pág. 43)

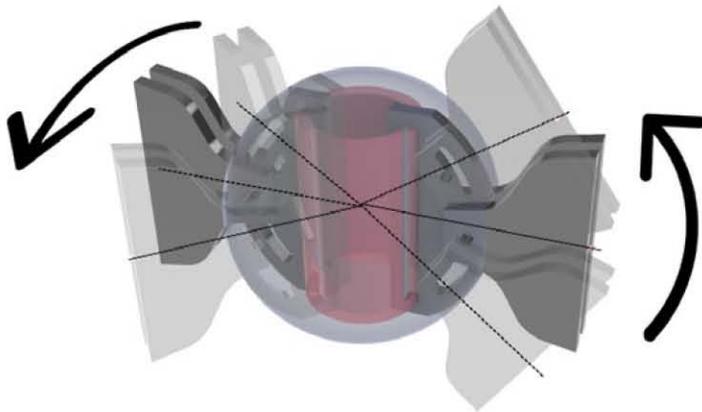


Figura 15: Movimientos concéntricos como premisa de diseño del nodo. Propia. (2023)

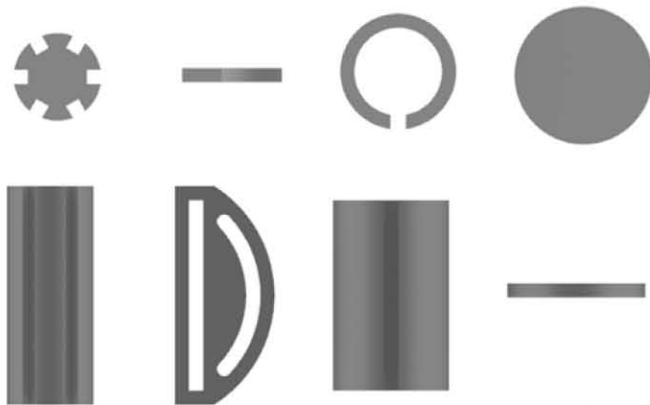


Figura 16: Piezas que conforman el nodo. Vistas en planta y alzado frontal. Propia. (2023)

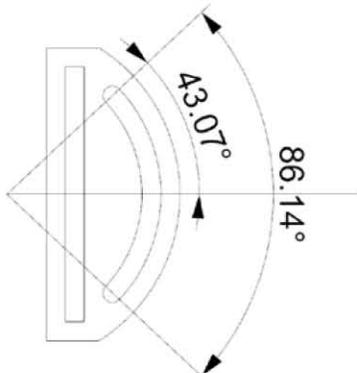


Figura 17: Ángulo máximo de apertura nodo. Propia. (2023)

El ensamble de las piezas que componen al nodo, se dió por pasar cada una de las aletas a través de un suaje realizado al tubo de acero circular OC con una apertura de 6 mm. Posteriormente, se inserta sólido liso redondo y se hacen coincidir los desvastes con las aletas para impedir movimiento. Finalmente se realiza soldadura 7018 para acero al carbono para fijar las placas circulares que coronan el nodo así como las aletas el tubo circular. (Fig. 18, pág. 43)

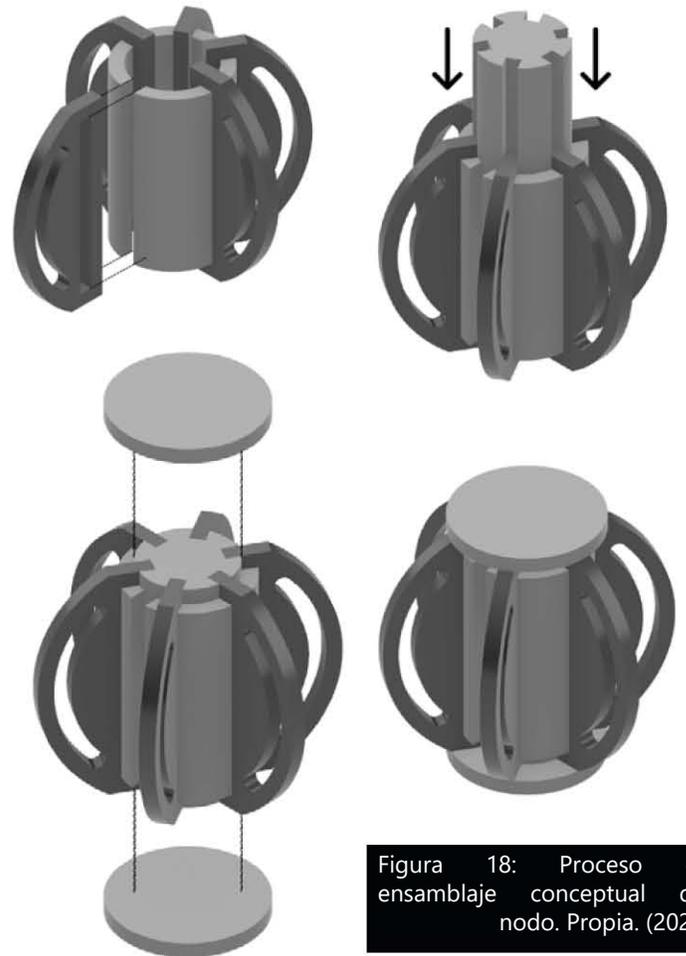


Figura 18: Proceso de ensamblaje conceptual del nodo. Propia. (2023)

Con el fin de conectar las aletas del nodo ya descritas, la barra debió ser constituida por (Fig. 19, pág. 44):

- Tubo OC circular de acero de $2 \frac{1}{2}''$. (73 mm x 5.16 mm)
- Oreja compuesta por tres placas de acero calibre 6 (4.39 mm) para abrazar cada aleta. Cada una con un barreno de $\frac{1}{4}''$. (6.35 mm)

3. METODOLOGÍA Y PROCESO DE DISEÑO

La fijación oreja - aleta fue facilitada por:

- Tornillo A325 alta resistencia estructural hexagonal negro (dentro de ASTM F3125) de $\frac{3}{4}$ " x $\frac{1}{4}$ ".
- Tuerca pesada ASTM A194/2H de alta seguridad $\frac{1}{4}$ " de acero al carbono.
- Rondana plana estructural F436 negra de acero templado de $\frac{1}{4}$ ".

Los detalles del nodo, ensamble, barra y conexión pueden ser consultados a detalle en el apartado de planos 10 al 12.

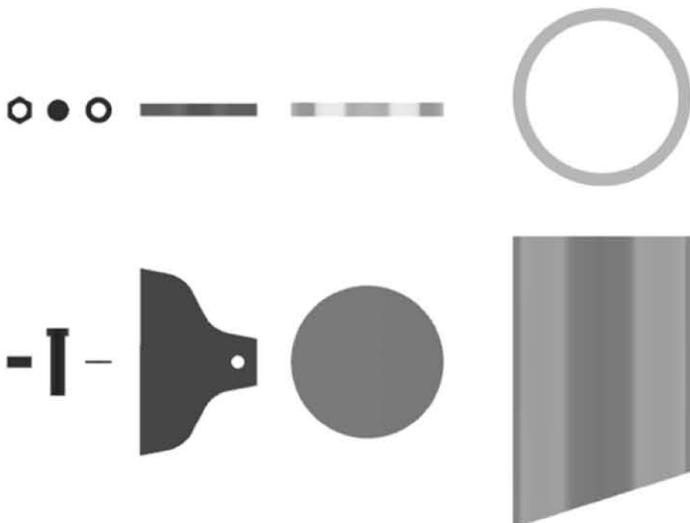


Figura 19: Piezas que conforman la conexión entre nodo y barra. Vistas en planta y alzado frontal. Propia. (2023)

Como se trató en el capítulo anterior, la teselación configurada arrojó módulos triangulares en donde una gran mayoría de sus nodos reciben 6 barras. Sin embargo, existen casos en donde pueden recibir 5 y hasta 7 barras sobre todo en zonas de cambio de curvatura en la geometría o cercanas a la condición de borde. (Fig. 20, pág. 44)

Esto llevo a cerciorarse que las barras no hicieran contacto entre sí. Ello por medio de los resultados de la evaluación en *Karamba 3D*, descrito más adelante en cuanto a la dimensión del perfil y el diseño de la forma de las piezas que comprenden el nodo.

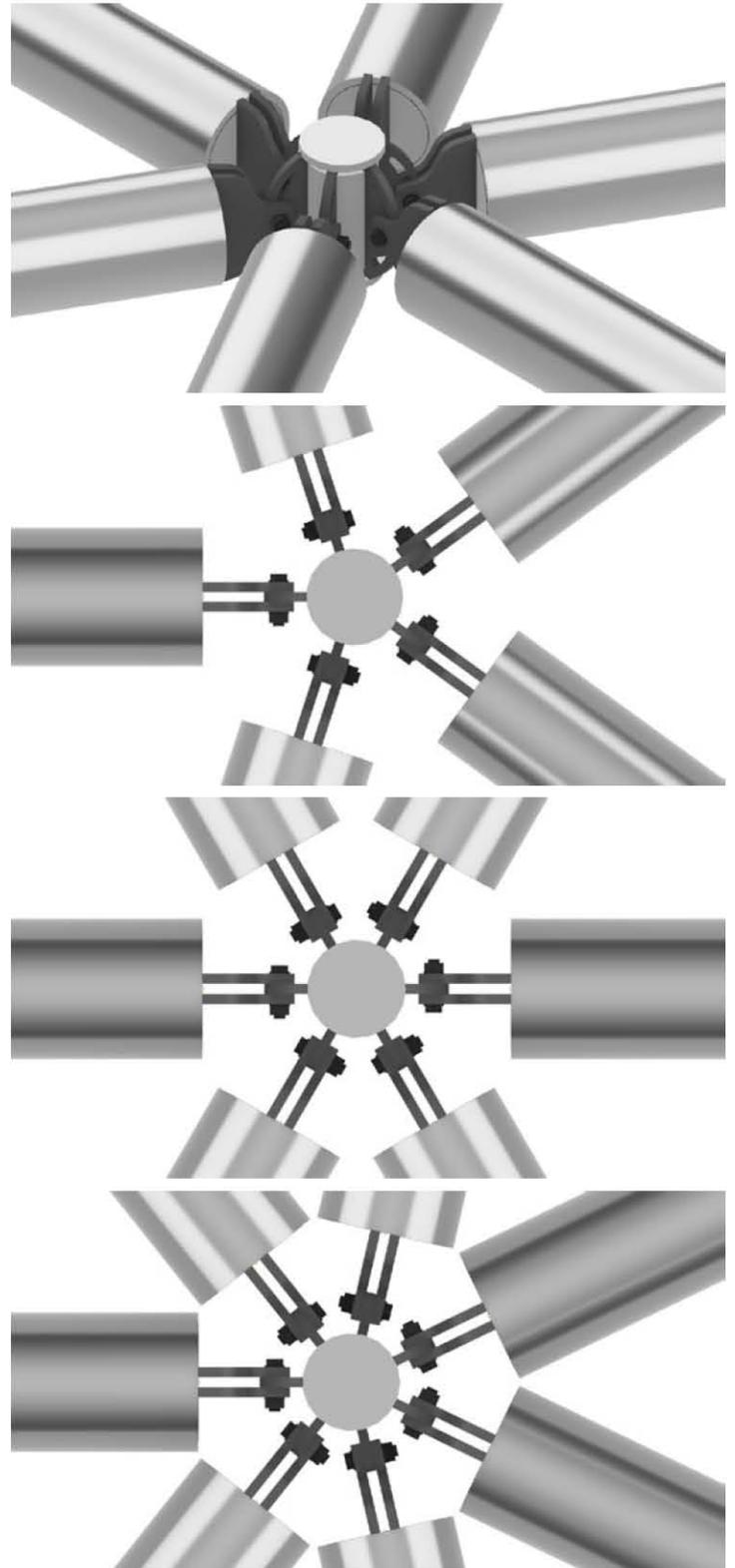
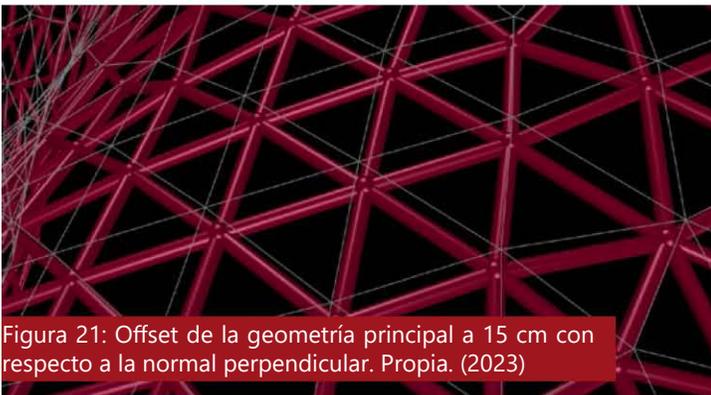


Figura 20: Isométrico de barras ensambladas al nodo. Diferentes configuraciones según elementos a anclar al nodo: 5, 6 y 7 barras respectivamente. Propia. (2023)

Para proteger la estructura portante, mantener confort térmico y hermeticidad con respecto al exterior, fue necesario plantear su cobertura. Aprovechando la geometría de la teselación, debía ser resuelta por placas planas triangulares conectadas en sus aristas a un nivel de paño más elevado que el de las barras y nodos.

Fue así que con el apoyo de la definición misma de *Grasshopper*, se llevó a cabo la operación de Compensar u *Offset*. Esta se encarga de generar círculos concéntricos y curvas paralelas. En el caso de la malla al aplicársele ésta operación, se buscó que en toda la extensión de la geometría tuviera como generatriz la normal de la misma. Ello con el fin de conservar la escala, evitar deformaciones y que sirviera como base de las placas planas triangulares. (Fig. 21, pág. 45)



Una vez conociendo las posiciones exactas en el espacio de las placas, siempre revisando la información simultáneamente con Karamba 3D, se optó por constituir la cubierta de la estructura portante por (Fig. 22, pág. 45):

- Vidrio de seguridad laminado - SGG STADIP PROTECT (2 PVB'S) de 9 mm - Saint Gobain

Sujeción a las barras por:

- Tornillo de anclaje para tubo redondo F/A01-M18-R54 Carbone Hardware.
- Araña 1 vía FS2041L Carbone Hardware.

- Araña 2 vías FS2042H Carbone Hardware.
- Perno 44 mm F/T32 Carbone Hardware.

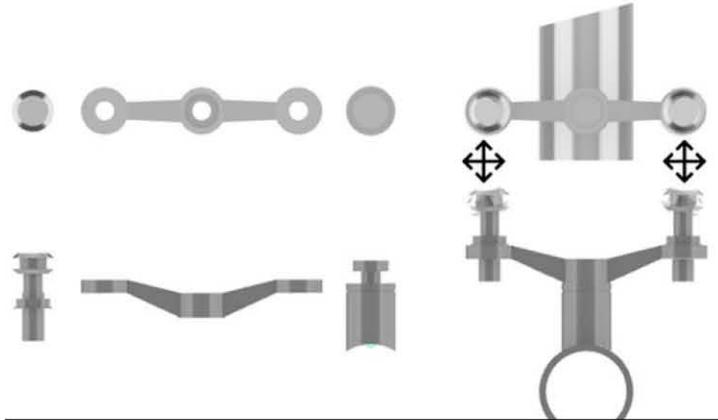


Figura 22: Piezas que conforman la sujeción entre vidrio y estructura portante. Vistas en planta y alzado frontal. Propia. (2023)

La sujeción del sistema de arañas de 1 o 2 vías, dependiendo del número de placas triangulares nones o pares, se propuso que sea con soldadura 7018 para acero al carbón a la parte superior de la barra cuidando que coincida con la normal perpendicular de ambos miembros a conectar. Esto a pesar de que los tornillos cuentan con una cabeza móvil, no cuentan con tanta libertad.

El vidrio se preparó con barrenos de 22 mm a una distancia de 15 cm con respecto al vértice de la placa que coincide con el centroide del nodo a distinto paño siguiendo la normal perpendicular. (Fig. 23, pág. 45)



Figura 23: Isométrico de módulo de estructura portante con sistema de arañas de sujeción a placa plana de vidrio triangular. Propia. (2023)

3.6 EXPERIMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS MECÁNICAS ADAPTABLES

Con el fin de otorgarle la condición de adaptabilidad a la cubierta, se optó por desarrollar a la par de la estructura portante y el análisis por medio de *Karamba 3D*, una capa final de cobertura sobre el resto de los elementos. Colocada en el paño exterior de las barras y nodos, así como encima de los planos de vidrio triangulares.

Ésta no sólo debía ser capaz de proteger del exterior los elementos constructivos susceptibles a recibir daño natural del medio ambiente y mantener hermeticidad, sino también contar con la capacidad de adaptarse ante condiciones climáticas cambiantes.

Siendo así, las premisas de diseño de estos elementos y del sistema adaptable en sí fueron:

- Mantener coplanaridad de nivel inmediato inferior es decir, de las placas planas de vidrio.
- Aprovechar en la medida de lo posible, estructura portante o nodos para dar soporte al sistema.
- Peso de elementos componentes al mínimo, por menor número de piezas y/o materiales ligeros.
- Desarrollar distintos tipos de módulo para satisfacer diferentes necesidades lumínicas, térmicas, sensoriales y espaciales al interior de la estructura.
- Tener la posibilidad de controlar de forma lo más autónoma posible, por medio de un sistema innovador de control y automatización, secciones de la cubierta dependiendo de las necesidades del espacio.
- Mecanizar adecuadamente las piezas que lo comprenden y reducir al mínimo posibilidades de desajustes o descomposturas.

Se enriqueció y aprovechó la definición de Grasshopper desarrollada para la generación de la estructura portante y la capa de vidrios triangulares coplanares. A la vez, se continuó con la revisión en directo con al definición en *Karamba 3D* para asegurar los pesos, dimensiones y resistencia estructural del sistema.

Teniendo en cuenta las premisas mencionadas anteriormente y retomando diferentes opciones formales de geometrías plegables, cinéticas, móviles y responsivas, se llevaron a cabo distintas propuestas de módulo mecánico adaptable. (Fig. 24, pág. 46)

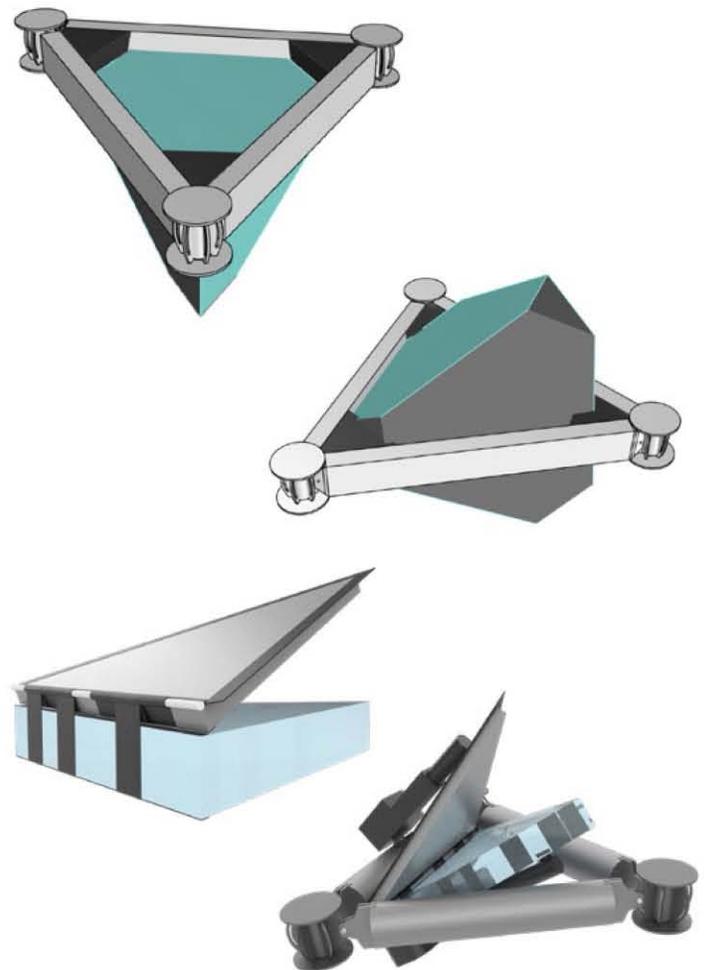


Figura 24: Dos estudios previos a propuesta final de módulo mecánico adaptable. Arriba: Poliedro de vidrio y parafina. Abajo: Panel y prisma de vidrio. Propia. (2022)

Sin embargo, la opción que progresó hasta sus últimas consecuencias por cumplir y adaptarse mejor con las premisas de diseño y la estructura en general, está compuesta por 6 módulos triangulares conectadas entre sí por 2 de sus aristas, compartidas con otros módulos. Éstos se pliegan y despliegan como un paraguas a partir de sus vértices más cercanos al centroide del polígono triangular contenedor.

Se llevó a cabo nuevamente la operación de Compensar u *Offset* dentro de *Grasshopper* a partir de la superficie compuesta por las placas de vidrio triangulares con respecto a la normal de las mismas para no perder la geometría a una distancia de 15 cm por encima de las mismas. Se extendió con respecto a la normal perpendicular del nodo una geometría capaz de pasar por la capa de placas triangulares hasta llegar al nivel de los módulos mecánicos adaptables, cumpliendo la premisa de diseño de aprovechar la estructura portante ya existente. (Fig. 25, pág. 47)

A partir de los centroides que coronan las geometrías cilíndricas antes descritas, se tomaron como base para formar los vértices de los módulos mecánicos. Se construyeron superficies planas y se les realizó una operación de Compensar, pero esta vez con respecto a cada uno de sus centroides para escalar de manera equidistante sus aristas a una razón de 20 mm. Ello para evitar colisiones entre las piezas cuando el ángulo de apertura sea reducido. (Fig. 26, pág. 47)

Se subdividieron los módulos triangulares en 6 partes, extendiendo una línea de cada vértice hasta el punto medio de la arista opuesta. (Fig. 27, pág. 47) Después se generaron superficies planas a partir de estos bordes previamente creados, para poder controlarlas cada una posteriormente como una pieza del sistema. (Fig. 28, pág. 47)



Figura 25: Estructura auxiliar para delimitar módulos, así como superficies cilíndricas apoyadas sobre el nodo. Propia. (2023)



Figura 26: Doble operación de *offset* o compensar en el nivel de los módulos por encima de las placas de vidrio triangulares. Propia. (2023)



Figura 27: Subdivisión vértice - mitad de arista para generación de un total de 6 módulos individuales. Propia. (2023)



Figura 28: Superficies planas individuales a partir de divisiones para control posterior de movimiento de los mismos. Propia. (2023)

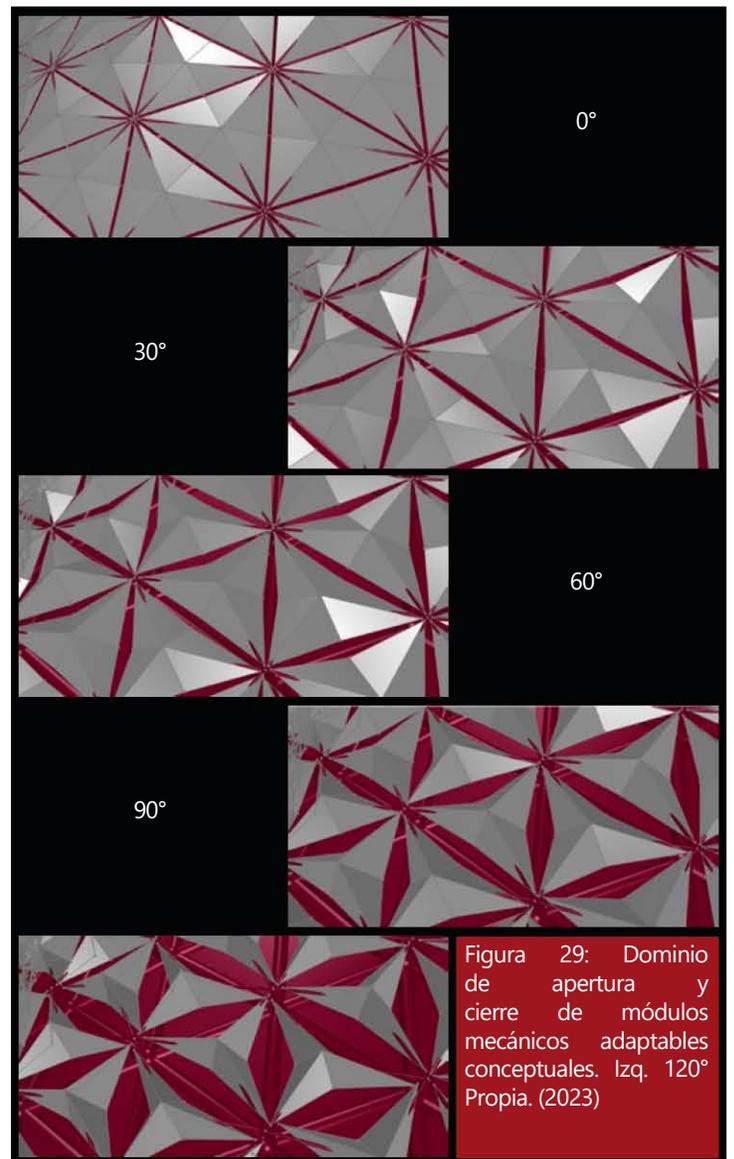
En este punto, para designar el movimiento de cada una de las 6 piezas, simular la apertura y cierre de los módulos así como la posición de sus aristas y sus vértices de todos los miembros componentes se utilizó la ayuda del plug-in *Kangaroo Physics* con el componente particular de *SOLVER*. Éste tiene la capacidad de sintetizar una serie de geometrías generadas y transformadas por el usuario en componentes con características y valores que son afectados por la física propia de un sistema de simulación del mundo real. Es decir, que pueden contener valores parametrizados de la realidad para ser probados y simulados en un ambiente digital ideal.

En el caso de este proyecto y los módulos mecánicos adaptables se utilizaron las siguientes variables:

- *Length(Line)* (Longitud (Línea)), en donde las aristas de cada uno de los planos se convierte en un "resorte" los cuales obtienen la capacidad de moverse y servir como ejes de movimiento por si mismos. Se delimita que la distancia que dichos resortes sea igual a la longitud de las aristas para que no cambie su dimensión.
- *FloorFriction* (Fricción de suelo), en donde los centroides de las superficies cilíndricas se determinan como los anclajes en planos a partir donde se evalúa el movimiento de los módulos. Se establecen los límites de dicha fricción al máximo para evitar desplazamientos en planos diferentes al de los centroides antes descritos.
- *Hinge* (Doblez), en donde se determinan que los 6 planos que componen el módulo obtienen la capacidad de doblarse sin cambiar su dimensión. Se delimitan el inicio y el final del doblez. En esta variable se le otorga un valor al ángulo de reposo inicial, final así como un dominio.

En los anexos se puede consultar a detalle la definición de *Grasshopper*.

El ángulo de reposo inicial de los 6 planos que comprenden al módulo adaptable se determinó en donde 0° representa coplanaridad a partir de los 3 centroides de las superficies cilíndricas que se extienden a partir de la parte superior del nodo. 0° como ángulo de reposo representa un módulo adaptable completamente cerrado. Se determinó un ángulo de reposo de 120° para delimitar un módulo abierto en su totalidad, es decir que el dominio de 0° a 120° en aumento de grado en grado en enteros representa la capacidad de apertura y cierre de un módulo. (Fig. 29, pág. 48)



Se propuso que la fabricación del módulo mecánico adaptable esté compuesta por (Fig. 30, pág. 49):

- Tapa cilíndrica de acero inoxidable de 1.2 cm de diámetro y 1.5 de alto, hueca, 4 piezas con el fin de coronar y cubrir tanto actuador lineal como cuerpos cilíndricos extendidos a partir del nodo para recibir varillas lisas.
- Varilla lisa, redonda sólida 304 de acero inoxidable y de $\frac{3}{16}$. 3 de ellas a manera de rieles con dimensiones a partir de los 50 cm de longitud unidas en sus extremos a tapa cilíndrica de acero y a base de actuador lineal con soldadura 7018 para acero al carbón. 3 piezas más empezando con 45 cm de longitud con extremos esféricos como articulaciones.
- Articulaciones deslizables impresas en 3D PACF Nylon con fibra de carbono, 3 piezas colocadas a través de los rieles de varilla lisa y en su parte superior albergar articulación de varillas móviles.
- Paneles móviles (plegables) ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno) de $\frac{1}{2}$ " (1.27 cm) de espesor. Corte CNC para piezas prismática y canales de unión vía impresión 3D. Temp. 215° C y cama de 60° C.
- Actuador lineal LA23 LINAK (2,500 N) con sujeción inferior a vidrio de seguridad laminado y articulaciones en la parte superior. Con extensión de brazo de hasta 50 cm.
- Cámara de contención de sensores ambientales de acrílico color humor, domo de 3 cm de diámetro correspondiente a tapa cilíndrica de acero inoxidable que corona el actuador lineal.
- Sensores ambientales para medición de luminosidad, humedad, temperatura y viento.

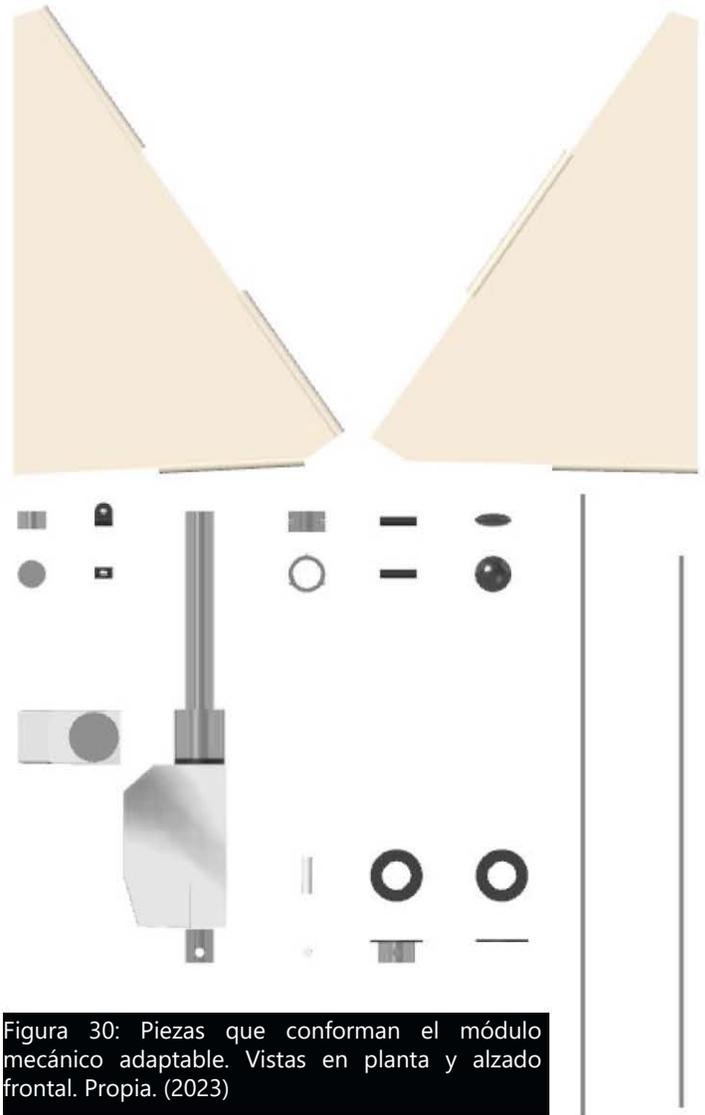
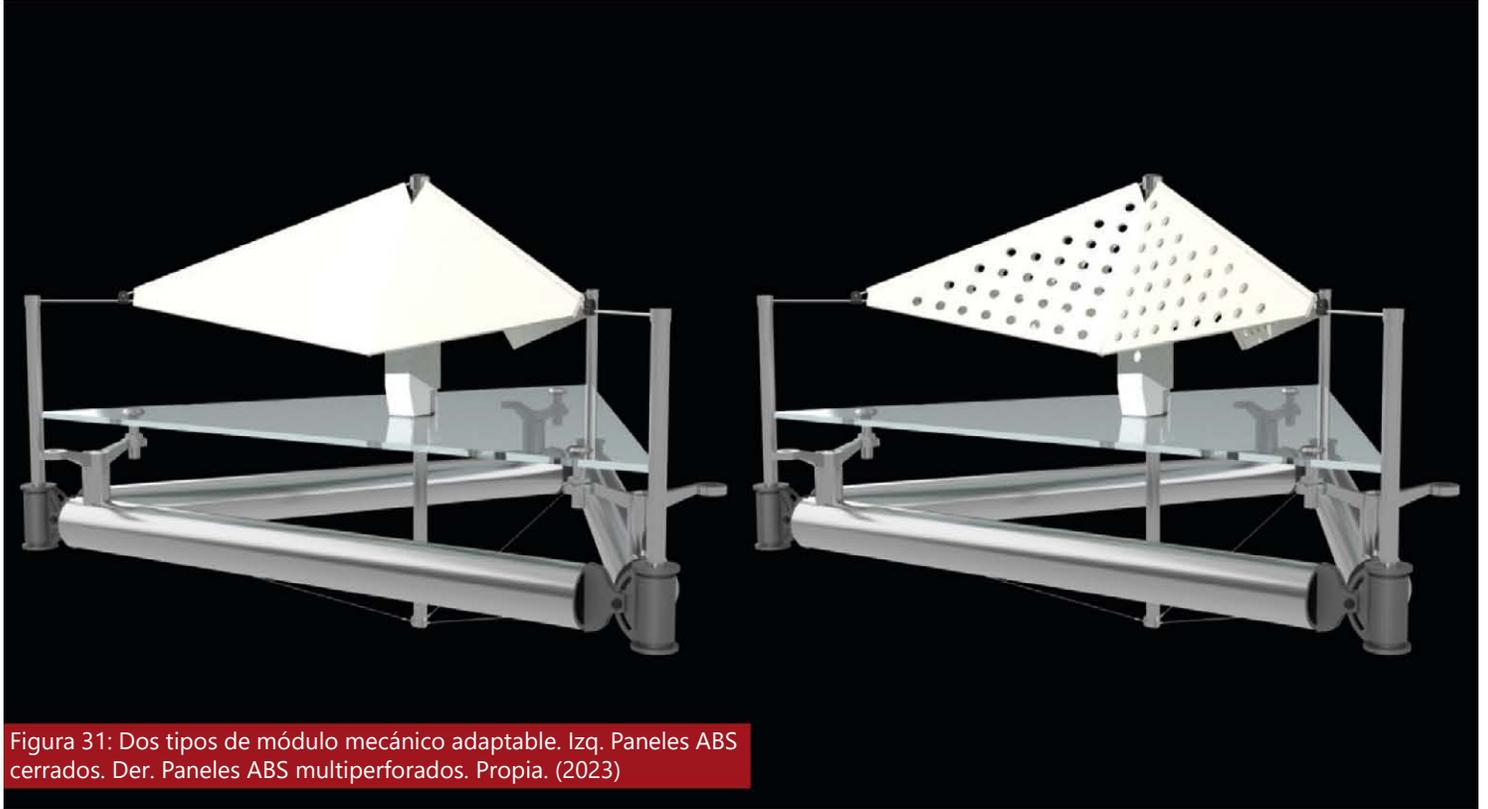


Figura 30: Piezas que conforman el módulo mecánico adaptable. Vistas en planta y alzado frontal. Propia. (2023)

Se propusieron también 2 tipos de paneles móviles dependiendo la zona a cubrir y sus necesidades al interior de la cubierta. Dichas zonas serán desglosadas en el capítulo 4.2. (Fig. 31, pág. 50)

Uno de ellos completamente cerrado u opaco en donde se controla completamente el paso de luz, el paso de agua y el paso del viento. La temperatura es posible controlarla también completamente.

La segunda opción comprende un panel multiperforado en donde se controla parcialmente el paso de luz, agua, viento y temperatura.



El proyecto de automatización plantea la problemática de ser capaz de mover los elementos de manera individual del módulo teniendo en cuenta el sistema de mecanización previamente resuelto, detección, lectura y adaptación de este ante condiciones meteorológicas diversas todo ello, para que, en la medida de lo posible, el usuario no interfiera en el proceso. Se establecieron una serie de criterios e intenciones como de solución, en este caso aplicado a uno o varios sistemas electrónicos, mecánicos y automáticos:

- Adapatación del sistema de automatización al de mecanización ya que este último se rige por su control de movimiento y geometría.
- Elección de arquitectura general del sistema.
- Identificación de tipo y cantidad de microcontroladores a utilizar según la uso, arquitectónico interior, particularidad e individualidad del módulo o cuadrante a resolver.

- Utilización de sensores de luz, temperatura y humedad (Fotorresistencias, sensores térmicos y pluviales) para detección de variables meteorológicas externas a partir de las cuales responde el módulo.
- Definición del tipo de actuadores encargados de realizar la acción de movimiento de apertura y cierre del módulo.

Retomando el proceso de generación de las 6 piezas individuales que componen el módulo mecánico adaptable, se llevó a cabo la prueba conceptual física y digital de la implementación de un sensor lumínico (fotorresistencia) como lectura de un estímulo externo para ser interpretado por un microcontrolador (*Arduino UNO*) y ejecutar un movimiento de rotación y posteriormente lineal por un servo-motor (actuador rotativo que permite el control de posición angular, aceleración y velocidad a diferencia de un motor normal). (Fig. 32, pág. 51)

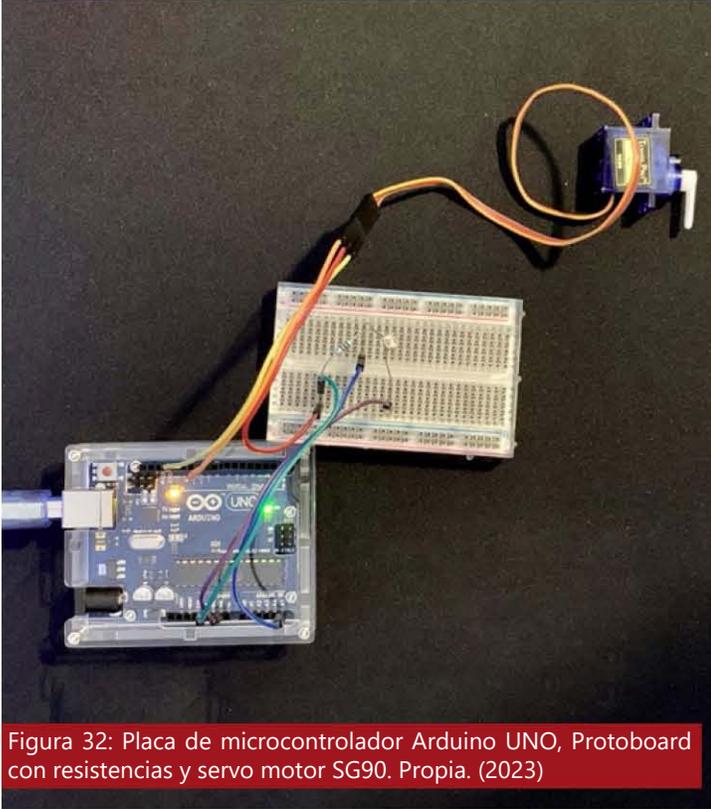


Figura 32: Placa de microcontrolador Arduino UNO, Protoboard con resistencias y servo motor SG90. Propia. (2023)

Es por ello que se realizó a la par del planteamiento del modelado y programación visual digital del módulo mecánico adaptable en *Rhinoceros 7* y *Grasshopper*, un programa dentro del software de *Arduino IDE* en lenguaje C++. (Fig. 33, pág. 52) El cual comprende:

- Funciones: Controlar la placa y realizar tareas y acciones.
- Variables: leer variables y diferentes tipos de datos entrantes.
- Estructura: elementos y procesos en *Arduino* basados en C++.

El programa se desarrolló llamando la librería "Servo" con la función "#include<Servo.h>", la cual convoca las características propias del control de un servo motor. Se creó una variable de tipo "Servo" con el nombre de "Motor" con la función "Servo Motor;" con la utilidad de nombrar el actuador.

Con la función "boolean Modo= true;" se indica, dependiendo del proceso a realizar, si este inicia con algún valor verdadero o falso, que en este caso indica modo manual o automático.

Dentro de "void setup()" se indican el tipo de vínculos entre Arduino UNO y el programa, en este caso se declaró que el "Motor" se conecta al "Pin 9" (el cual junto con el "Pin 10" soportan este tipo de actuadores) y que la velocidad de conexión "Serial.begin (115200);" en baudios (unidad de tiempo en Arduino) será la máxima disponible para procesos en tiempo real.

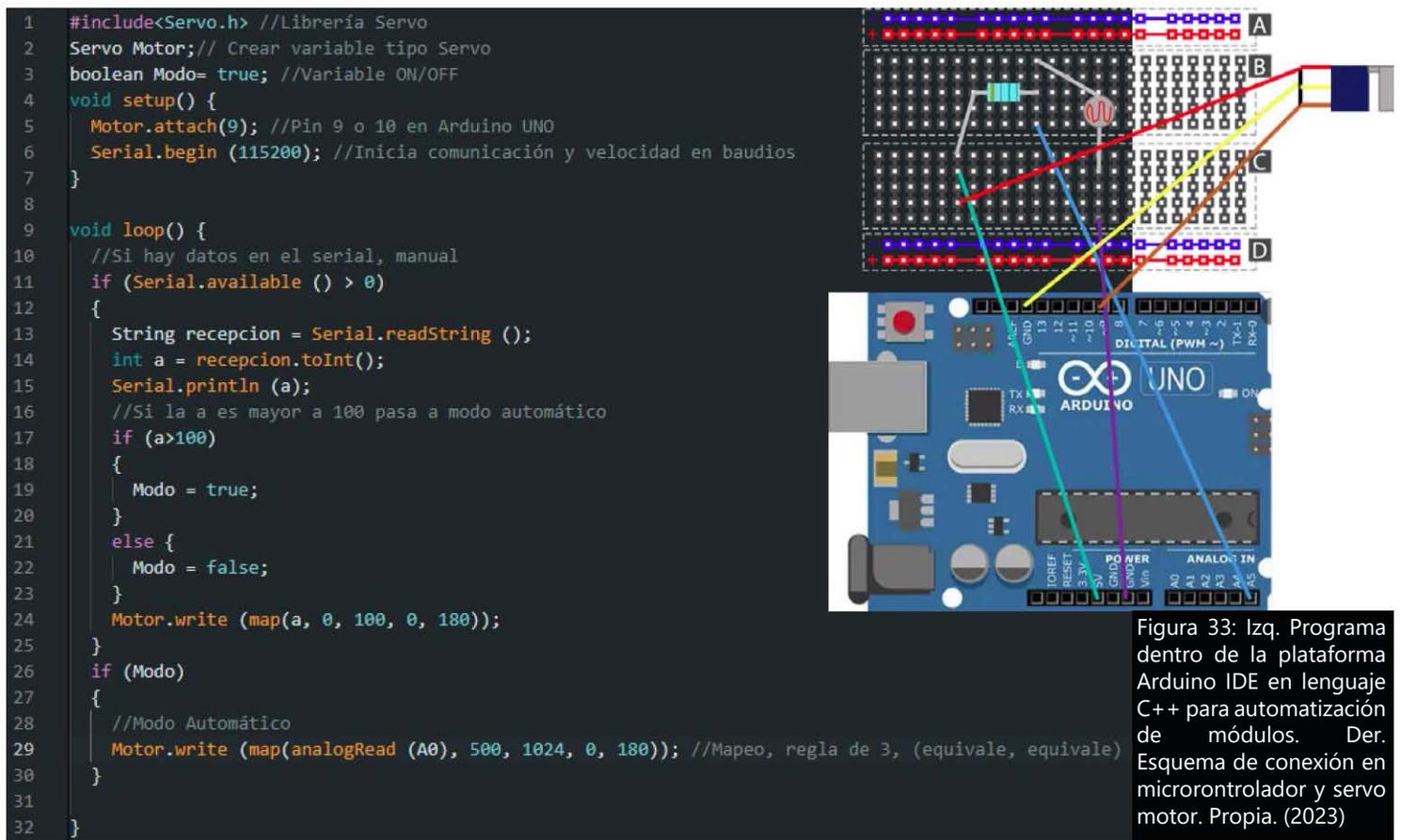
Posteriormente en "void loop()" se declara un proceso cíclico e iterativo que se realizará indefinidamente o hasta que una condición se encargue de indicar su término.

Dentro de este mismo se indica si en el serial hay algún dato se torna el control manual del Servo motor, por lo que se debe declarar en "String recepcion = Serial.readString (); // int a = recepcion.toInt(); // Serial.println (a);" que a partir de la fotorresistencia se recibirá cierto valor, el cual debe convertirse a un dato legible por Arduino y posteriormente devolver la orden al imprimirla al Servo motor.

El proceso iterativo que sigue el programa es el de: "if (a>100) // { // Modo = true; // } // else { // Modo = false; // } // Motor.write (map(a, 0, 100, 0, 180));" lo cual indica que si el valor de "a", en este caso la fotorresistencia, es mayor a 100 (con respecto a su capacidad de lectura), pasará a modo automático, girando el servomotor hasta su punto de giro máximo, en este caso 180°.

De ser verdadera la condición, el movimiento del Servo motor dependerá del porcentaje de luz percibido, si esta es menor a 100, se mantendrá con una rotación menor a 180°.

El programa se compila y se carga en el *Arduino UNO*.



Se trabajó a la par del modelo digital, un módulo mecánico adaptable junto con un sistema conceptual de automatización en escala 1:5. Ello, con el fin de probar la viabilidad del sistema, sus movimientos así como sus proporciones generales.

El material elegido para realizar el modelo fue el de PLA (Ácido Poliláctico) biodegradable impreso 3D a una temperatura de 215° C y una base a 55° C. Se escalaron y sintetizaron las piezas dentro de *Rhinoceros 7* y se prepararon los archivos correspondientes para su impresión en el software de *CURA 15.04.6* en una *MonoPrice Mini V.2*. Cabe destacar que se tuvo que ajustar la piezas que representa el actuador lineal al servomotor rotativo antes mencionado junto con una adaptación a un movimiento lineal por medio de una pieza dentada junto con un engrane. (Fig. 34, pág. 53)

Se ensamblaron las piezas tal y como replicaría su armado en escala 1:1, colocando los tubos en el nodo con ayuda de las orejas como coples. Una vez concluido este nivel, se colocó una pantalla de PETG para simular la palca plana triangular de vidrio. posteriormente se ensamblaron las 6 partes del módulo mecánico en la sección superior junto con los rieles y ejes de rotación y movimiento. Finalmente se colocó el actuador lineal en la parte inferior y un sensor lumínico para completar el prototipo. (Fig. 35, pág. 53)

El modelo fue probado al aire libre con condiciones soleadas y simulando artificialmente variaciones de sombra para observar las reacciones y movimientos del sistema. Se comprobó que el diseño del módulo conceptualmente no tiene errores y que las piezas trabajando en conjunto no arrojan errores observables al menos no en corto plazo. (Fig. 36, pág. 54)

Figura 34: Piezas individuales impresas en 3D con PLA para prototipo a escala. 3 diferentes colores simulando materialidad. Propia. (2023)

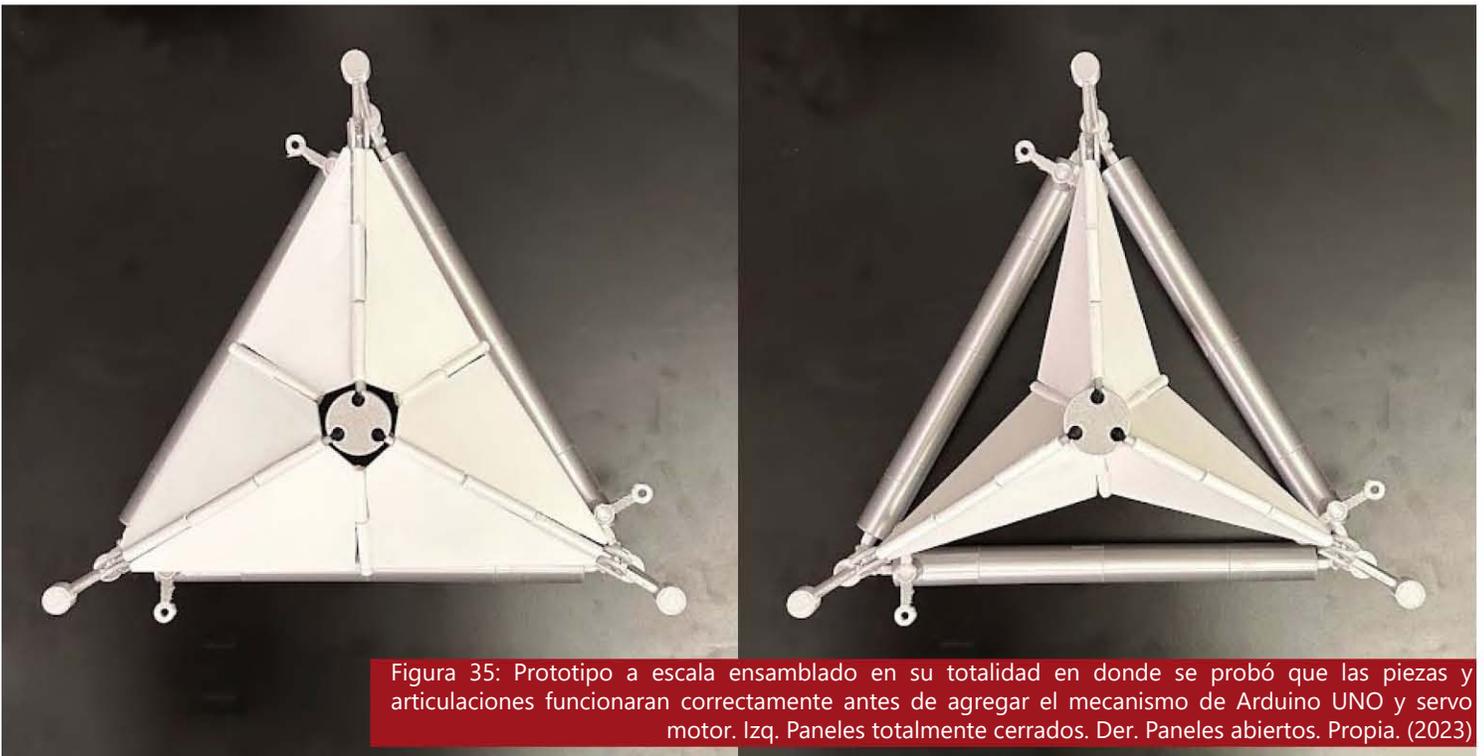
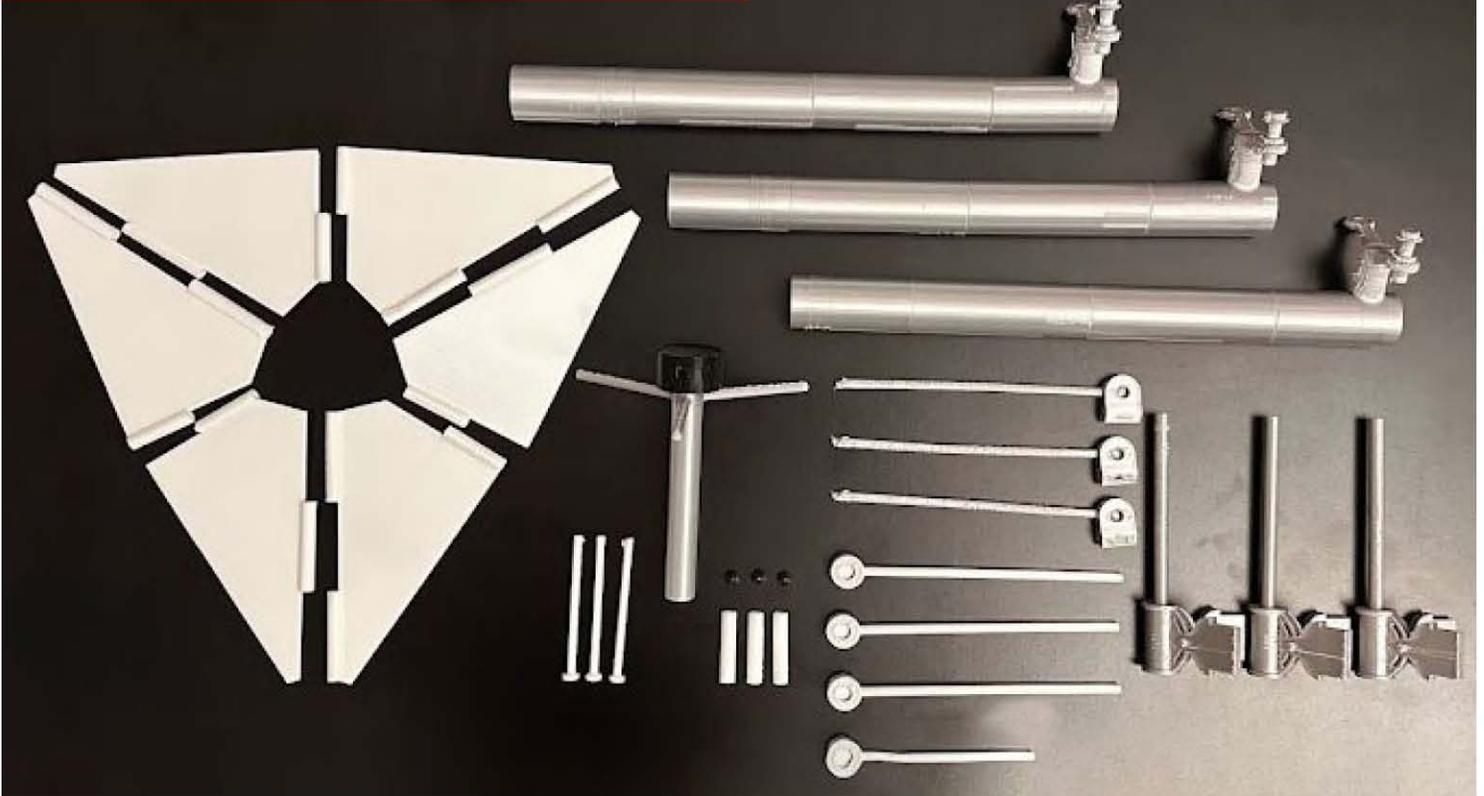


Figura 35: Prototipo a escala ensamblado en su totalidad en donde se probó que las piezas y articulaciones funcionaran correctamente antes de agregar el mecanismo de Arduino UNO y servo motor. Izq. Paneles totalmente cerrados. Der. Paneles abiertos. Propia. (2023)

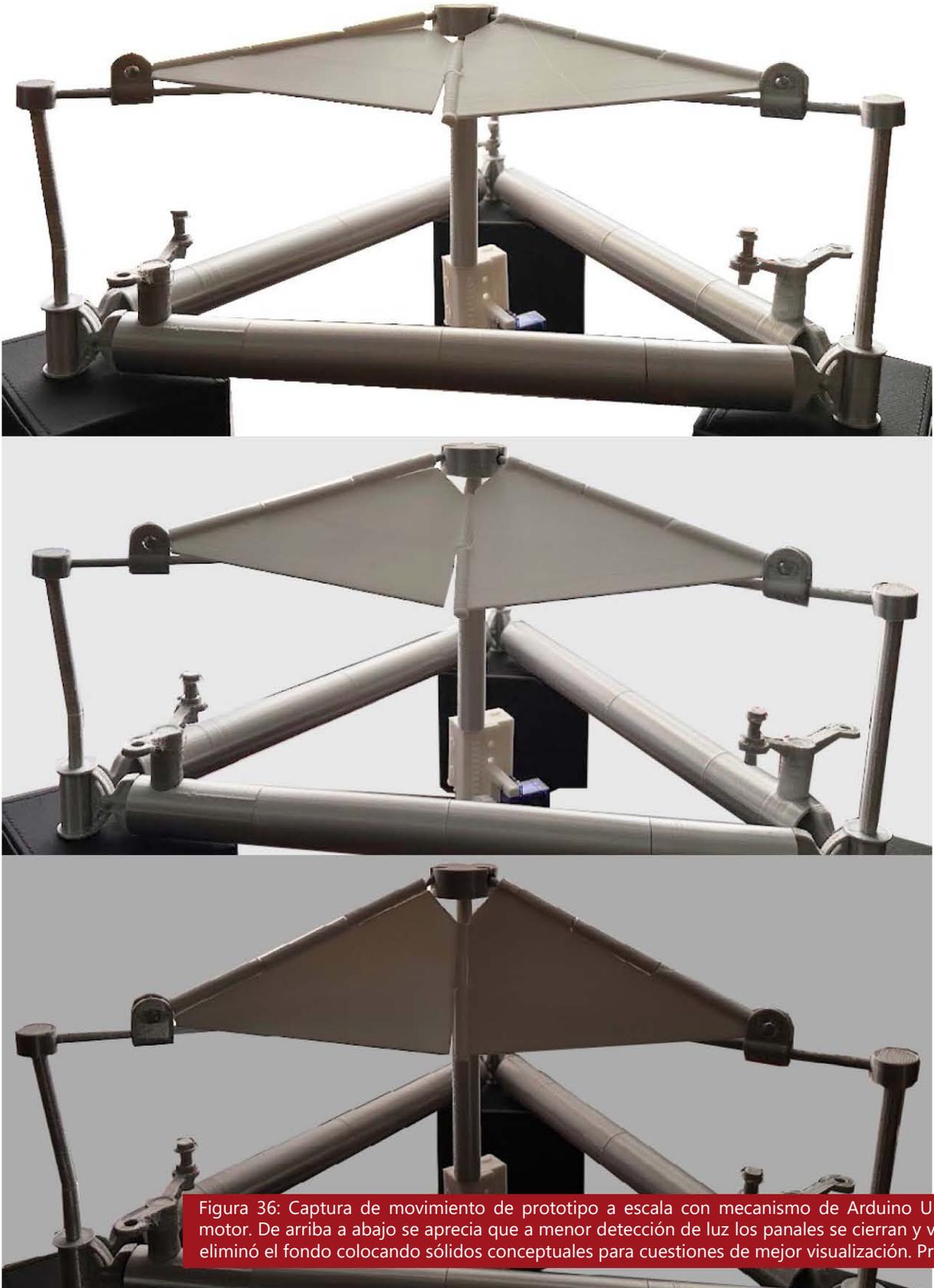


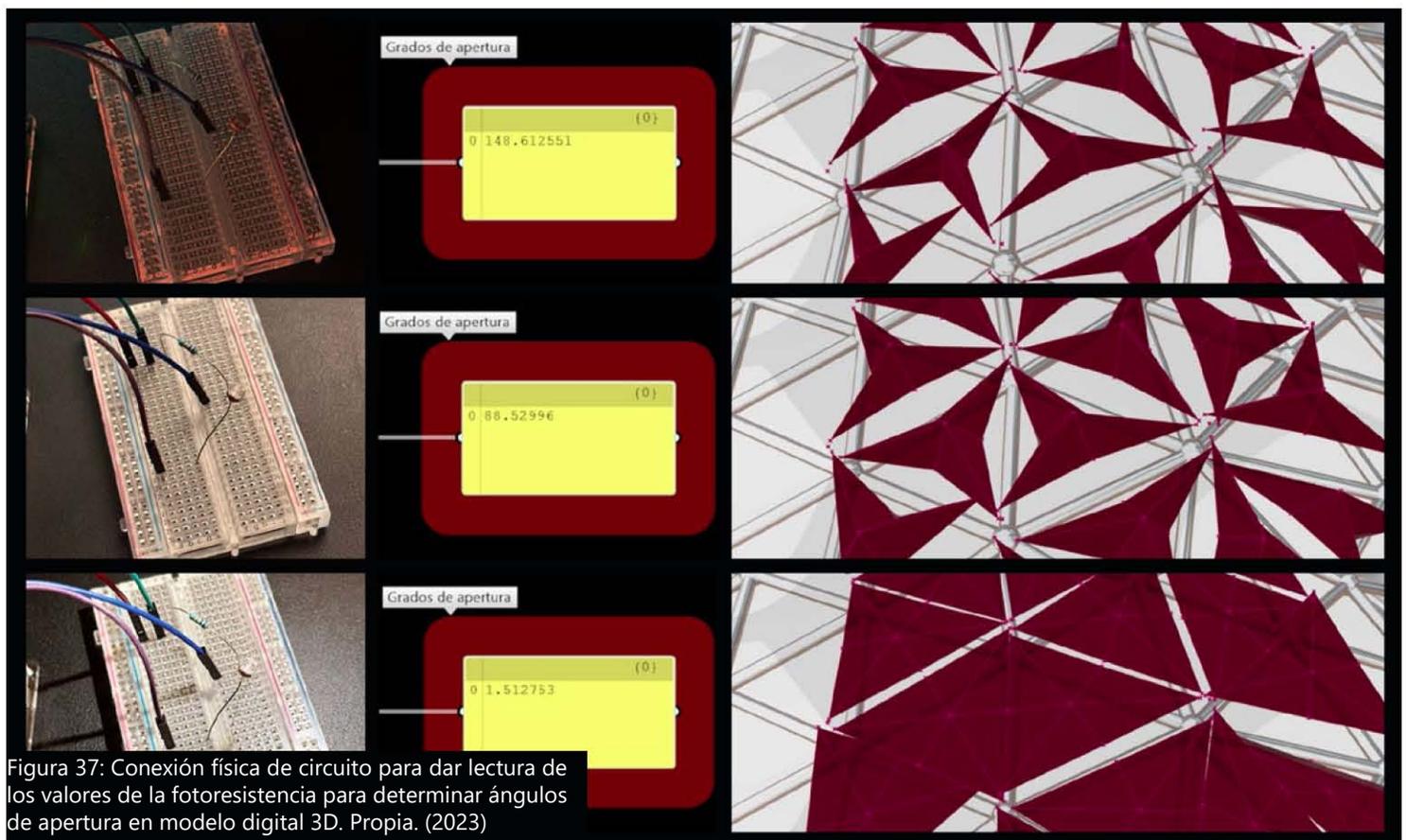
Figura 36: Captura de movimiento de prototipo a escala con mecanismo de Arduino UNO y servo motor. De arriba a abajo se aprecia que a menor detección de luz los panales se cierran y viceversa. Se eliminó el fondo colocando sólidos conceptuales para cuestiones de mejor visualización. Propia. (2023)

Finalmente, complementando y completando la definición de *Grasshopper* en donde se encuentran los miembros de la estructura portante así como los módulos mecánicos adaptables, se agregó una sección en el *plug-in* de *Firefly 1.0.0.70* para automatizar visualmente el modelo digital dentro de *Rhinoceros 7*.

Para ello tuvo que traducirse el lenguaje C++ al de programación visual. *Firefly* incluye componentes de escritura y lectura, así como de entradas y salidas de distintos puertos para comunicarse con *Arduino* directamente desde *Grasshopper*.

Fue así que se abrió la comunicación con el microcontrolador seleccionando el puerto de entrada designado y una velocidad de conexión de 115200 baudios.

Después se agregó un componente de lectura en donde aparecen los pines(puertos) tal y como están físicamente nombrados en la placa junto con un temporizador para actualizar la lectura a tiempo real, esto con el fin de recibir los datos provenientes de la fotorresistencia. Cubriendo en su totalidad y agregando luz artificial directa al sensor, se evaluó un dominio de máximos y mínimos traducido en números enteros comprendido del 19 al 1007. Posteriormente a la obtención de estos valores se convirtieron a grados sexagesimales del 1 al 150, esto para simular la apertura del módulo mecánico real. Finalmente se agregó esta parte de la definición a la existente y se conectó el valor de ángulo al input de rotación de *Kangaroo Physics*. Dando como resultado una visualización en tiempo real dentro del modelo de apertura y cierre de los módulos. (Fig. 37, pág. 55) Se recuerda que la definición puede ser revisada en el Anexo 01.



3.7 ANÁLISIS MECÁNICO-FORMAL MEDIANTE KARAMBA 3D

Como se ha mencionado, se llevó a cabo a la par el desarrollo de la propuesta en la estructura portante, la experimentación y el análisis de estrategias mecánicas adaptables así como esta sección.

Una vez definidos los materiales a utilizar, tanto en el sistema de modulación como en la estructura portante, es posible analizar de manera más precisa los resultados formales generados por *RhinoVAULT2*.

Un primer paso, consiste en la corroboración de su estabilidad estática. Para realizar un análisis estático de cargas muertas en la cubierta se utilizó la herramienta de *Karamba 3D*, la cual puede ser utilizada de forma directa dentro de *Rhinoceros 7* y *Grasshopper*, software en el cual la geometría fue trabajada.

Cabe destacar que este análisis tiene el propósito de descartar errores formales que puedan generar deformaciones indeseadas en la cubierta, sin embargo, busca analizar únicamente cargas gravitacionales. Un análisis que contemple las condiciones de viento que pueden afectar la cubierta debe ser realizado posteriormente.

El flujo de trabajo dentro del plug-in es el de: Designar elementos componentes del modelo a evaluar, dotar de materiales, agregar condiciones de carga y síntesis de resultados.

El análisis fue llevado a cabo a partir del modelo formal generado tras la optimización de las triangulaciones de la cubierta. Para realizar este proceso, se obtuvieron los vértices, aristas y mallas de la solución formal. Estos elementos fueron introducidos al software como nodos, barras, paneles y módulos respectivamente.

Una vez realizada la selección de estos elementos, se procedió a asignar materiales de la siguiente manera:

- **Barras:** Acero A53 Grado A. Este material se eligió como el adecuado para la realización de la estructura de barras y nodos. El principal motivo de elección de este material proviene de su adecuada resistencia estructural y la existencia de perfiles comerciales que satisfacen el criterio de predimensionamiento de los elementos. La sección óptima elegida por criterio propio fue un OC de 1 ½" (48 x 5.08 mm), elección que se demostrará acertada en el presente capítulo. Las intersecciones y apoyos fueron definidos como empotrados ya que si bien el nodo tiene un grado de movilidad, al estar ensamblado queda totalmente fijo.
- **Nodos:** Se definió que estos deberían ser de placa de acero calibre 6 (4.39 mm). Debido a que los nodos consistieron en una solución estructural nueva propuesta para este proyecto para permitir ajustes de forma libre, es posible realizar estos en diversos materiales. Sin embargo, en este caso fue decidido conservar un material uniforme en la estructura portante.
- **Paneles:** Para estos elementos, las propiedades y pesos obtenidos en el apartado de Análisis térmico, fueron utilizados, definiendo un peso total por panel de 9.89 kg, en un área triangular promedio de 0.43 m² por módulo. Este peso considera el peso del vidrio de seguridad laminado de 9 mm y los materiales de sellado y anclaje para generar la hermeticidad deseada.

Para poder realizar un análisis con estos materiales, sus propiedades fueron investigadas y agregadas de forma manual, para poder así realizar un correcto análisis estático. Las propiedades más importantes para introducir en este proceso son: el Módulo de Young, el Módulo de Elasticidad, el peso del material, el Coeficiente de Expansión Térmica, y los valores de resistencia tanto a tracción como compresión. Dichas propiedades fueron definidas para cada material. (Fig. 38, pág. 57)

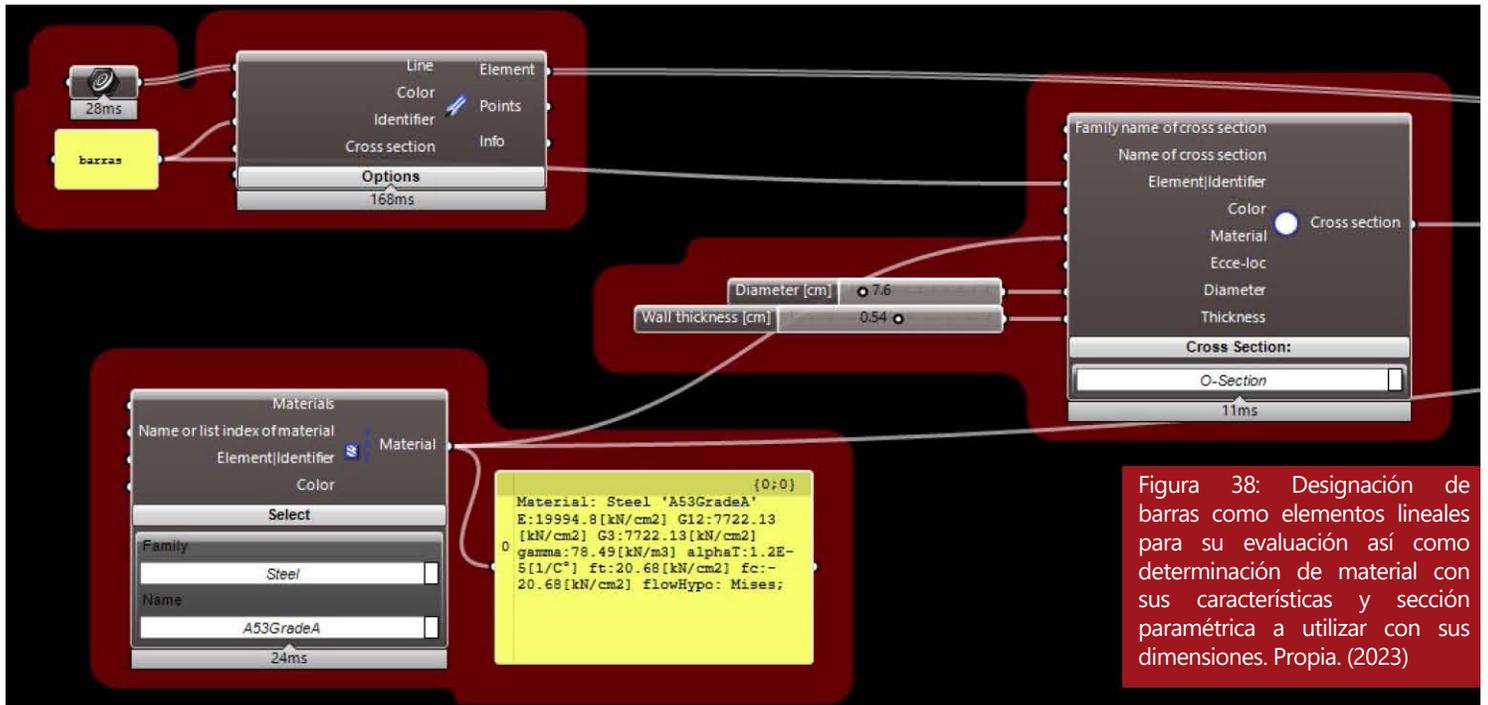


Figura 38: Designación de barras como elementos lineales para su evaluación así como determinación de material con sus características y sección paramétrica a utilizar con sus dimensiones. Propia. (2023)

Los materiales anteriores, sin embargo, no contemplan los módulos mecánicos adaptables. Para resolver de forma estática la existencia de este componente, se agregó un peso uniformemente repartido por cada módulo, para representar el peso del actuador lineal LA23 LINAK (2,500 N), articulaciones deslizables, varillas lisas y los paneles móviles de ABS que componen el sistema del módulo. (Fig. 39, pág. 58)

Una vez introducidos los datos se procedió a la realización del análisis, cuyos resultados concluyeron lo siguiente: Los resultados finales del cálculo concluyeron (Fig. 40, pág. 58):

- La estructura tendría un desplazamiento máximo a lo largo de toda su extensión de 0.1024 cm.
- El trabajo estructural de la forma de la cubierta es a compresión pura resultado que confirma lo supuesto por RhinoVAULT 2 durante la generación de la forma.

- Los valores del dominio de utilización a esfuerzos se encuentran dentro del 0% a 2.3%, lo que significa que sus cargas muertas estáticas están equilibrio y ninguno de sus miembros presenta deformaciones significativas ni cambios en su régimen de carga.
- La sección del perfil y el tipo de acero a elegido es correcto y permite conservar el equilibrio del sistema.
- La carga más crítica en un nodo se encuentra en los apoyos centrales. En los apoyos de mejor diámetro, esta carga equivale a 12.37 kN. En el apoyo perimetral la mayor carga equivale a 9.53 kN, lo que corresponde a la zona de la estructura que baja entre los dos apoyos de mayor flecha.

Tras el análisis obtenido, es posible concluir que el planteamiento tanto de la estructura como de su sistema constructivo y materiales es correcto, produciendo una cubierta de gran ligereza y excelente comportamiento ante las cargas gravitacionales. (Fig. 41, pág. 59)

3. METODOLOGÍA Y PROCESO DE DISEÑO

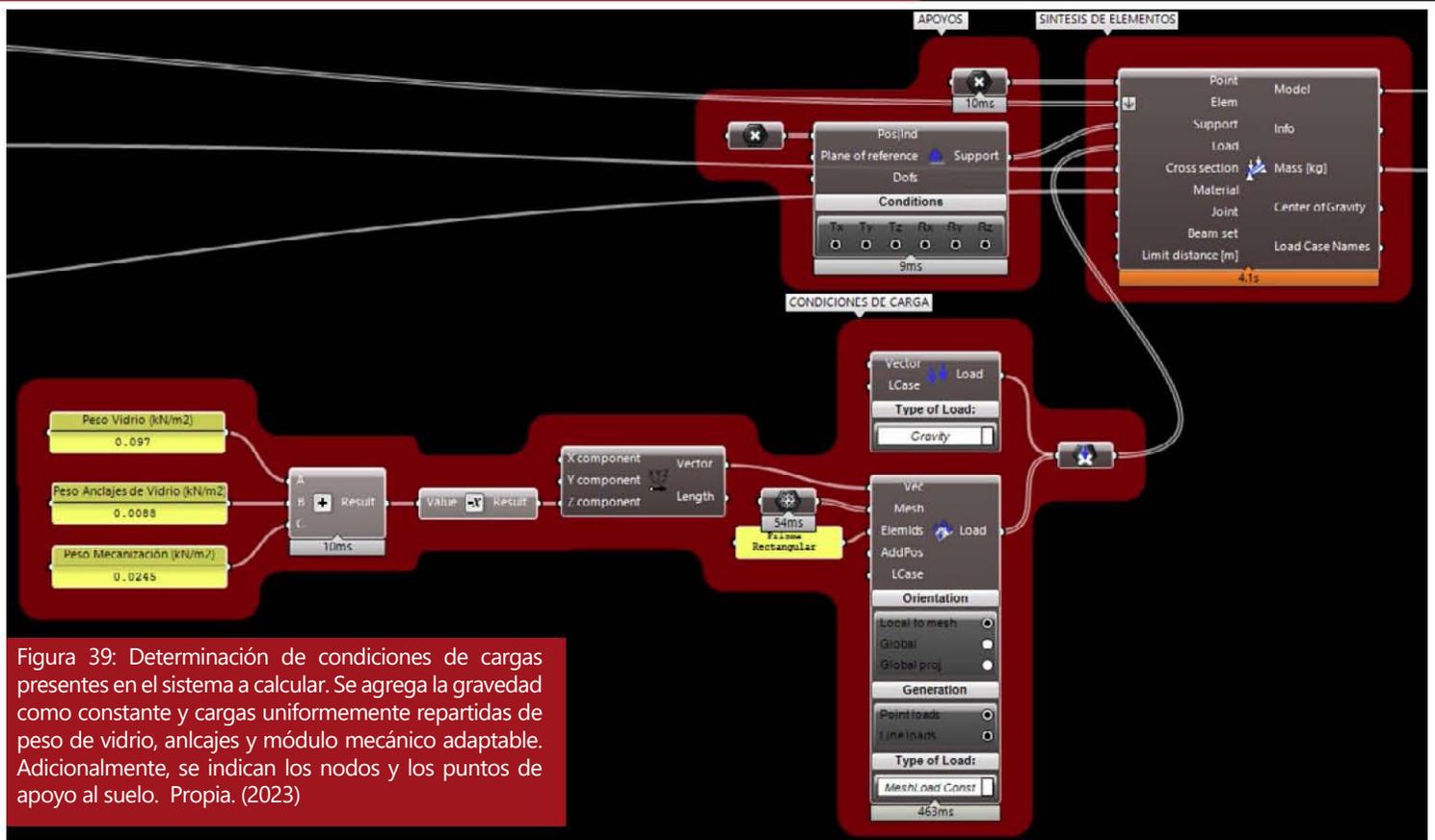


Figura 39: Determinación de condiciones de cargas presentes en el sistema a calcular. Se agrega la gravedad como constante y cargas uniformemente repartidas de peso de vidrio, anclajes y módulo mecánico adaptable. Adicionalmente, se indican los nodos y los puntos de apoyo al suelo. Propia. (2023)

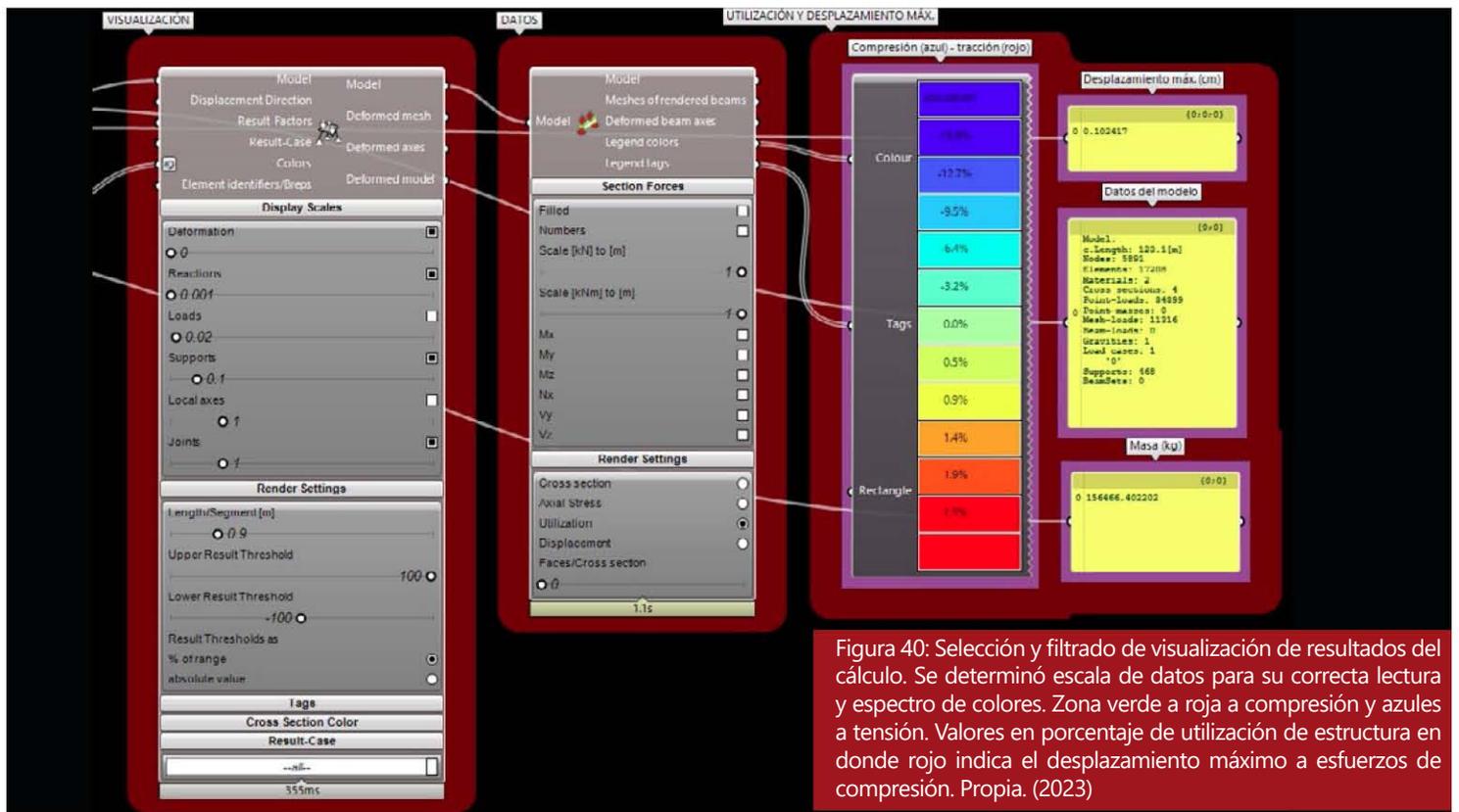


Figura 40: Selección y filtrado de visualización de resultados del cálculo. Se determinó escala de datos para su correcta lectura y espectro de colores. Zona verde a roja a compresión y azules a tensión. Valores en porcentaje de utilización de estructura en donde rojo indica el desplazamiento máximo a esfuerzos de compresión. Propia. (2023)

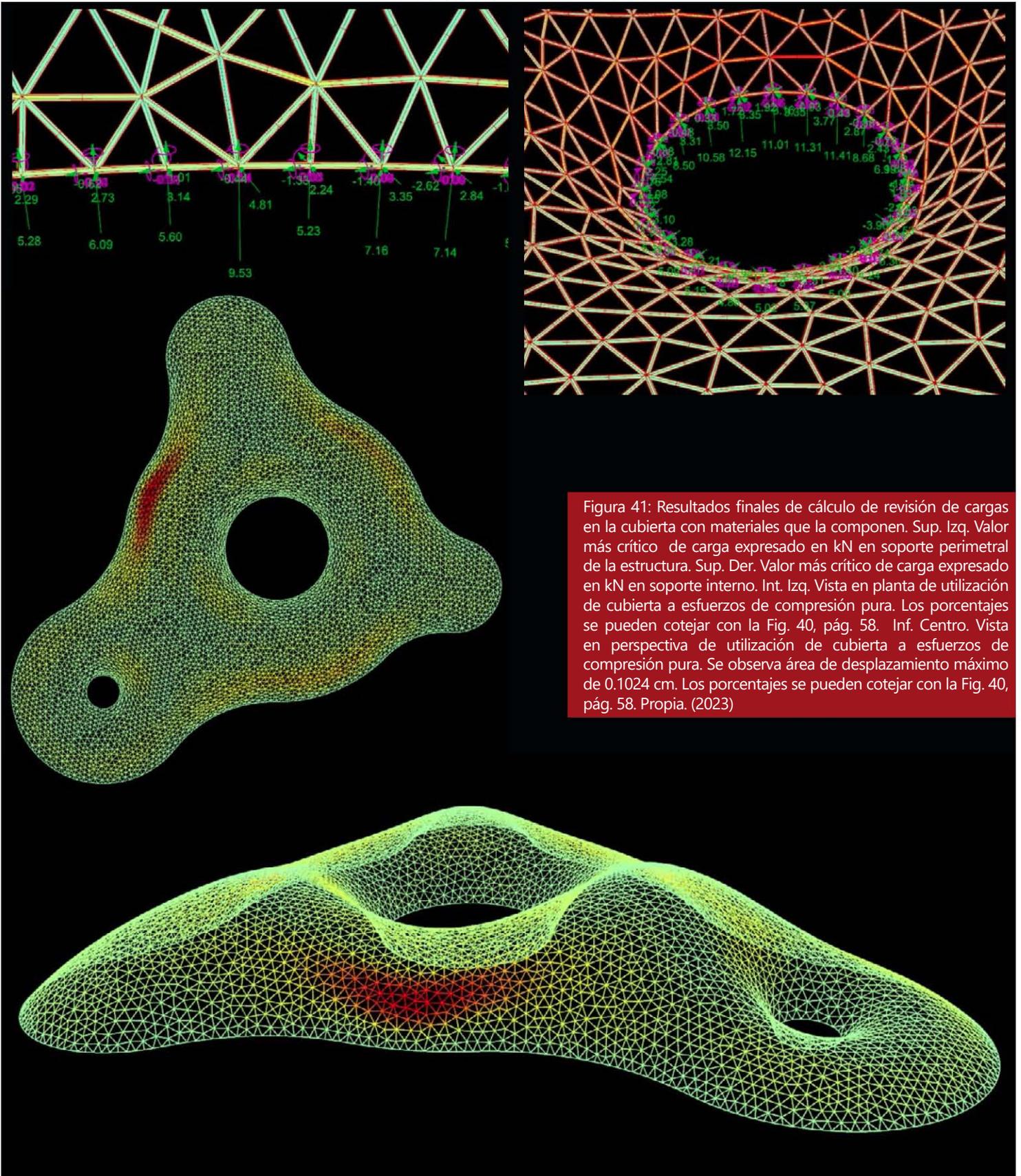


Figura 41: Resultados finales de cálculo de revisión de cargas en la cubierta con materiales que la componen. Sup. Izq. Valor más crítico de carga expresado en kN en soporte perimetral de la estructura. Sup. Der. Valor más crítico de carga expresado en kN en soporte interno. Int. Izq. Vista en planta de utilización de cubierta a esfuerzos de compresión pura. Los porcentajes se pueden cotejar con la Fig. 40, pág. 58. Inf. Centro. Vista en perspectiva de utilización de cubierta a esfuerzos de compresión pura. Se observa área de desplazamiento máximo de 0.1024 cm. Los porcentajes se pueden cotejar con la Fig. 40, pág. 58. Propia. (2023)

3.8 SÍNTESIS Y APLICACIÓN DE RESULTADOS

Durante este capítulo fue explicado el proceso mediante el cual se llegó a la propuesta de solución de la "Cubierta habitable adaptable ante condiciones ambientales cambiantes".

Comparando mediante el diagrama filogenético varias soluciones formales propias no solo entre sí, sino también con proyectos ya consolidados como válidos para una tipología similar. Llegando a una propuesta geométrica original pero congruente y estética.

Dando una solución que garantice una estructura completamente a compresión con *RhinoVAULT 2*, es importante aclarar que fue usado como herramienta de apoyo, ya que para un funcionamiento correcto de un sistema estructural gran parte depende de cómo la suma de sus elementos constructivos interactúan entre sí como un todo.

Teniendo la posibilidad de modificar paramétricamente en *Grasshopper* la estructura portante entendiéndola como el primer nivel de tres que comprenden la cubierta. Las partes que la componen y el cómo se ensamban entre sí. Un segundo nivel para recubrir las barras y los nodos con placas planas triangulares para conservar hermeticidad.

Finalmente el diseño de un tercer nivel de un módulo mecánico adaptable y automatizado, replicable y ligero. Desarrollado y probado digitalmente con *Kangaroo Physics* y *Firefly*, así como físicamente con un modelo a escala funcional.

Revisando su comportamiento estático con cargas propias y muertas gravitacionales en *Karamba 3D*, comprobando en tiempo real su eficiencia al modificar las secciones paramétricamente y adicionando los pesos que actúan sobre toda la cubierta. Para detectar y evitar deformaciones en ella.

Mientras que este documento divide dicho proceso en secciones, es importante mencionar que el proceso de diseño de este proyecto no fue lineal, por lo que las distintas secciones generaron una retroalimentación constante que permitió la modificación continua de las propuestas hasta la generación de una en la cual los aspectos térmicos, mecánicos, arquitectónicos y estructurales conviven de manera correcta.

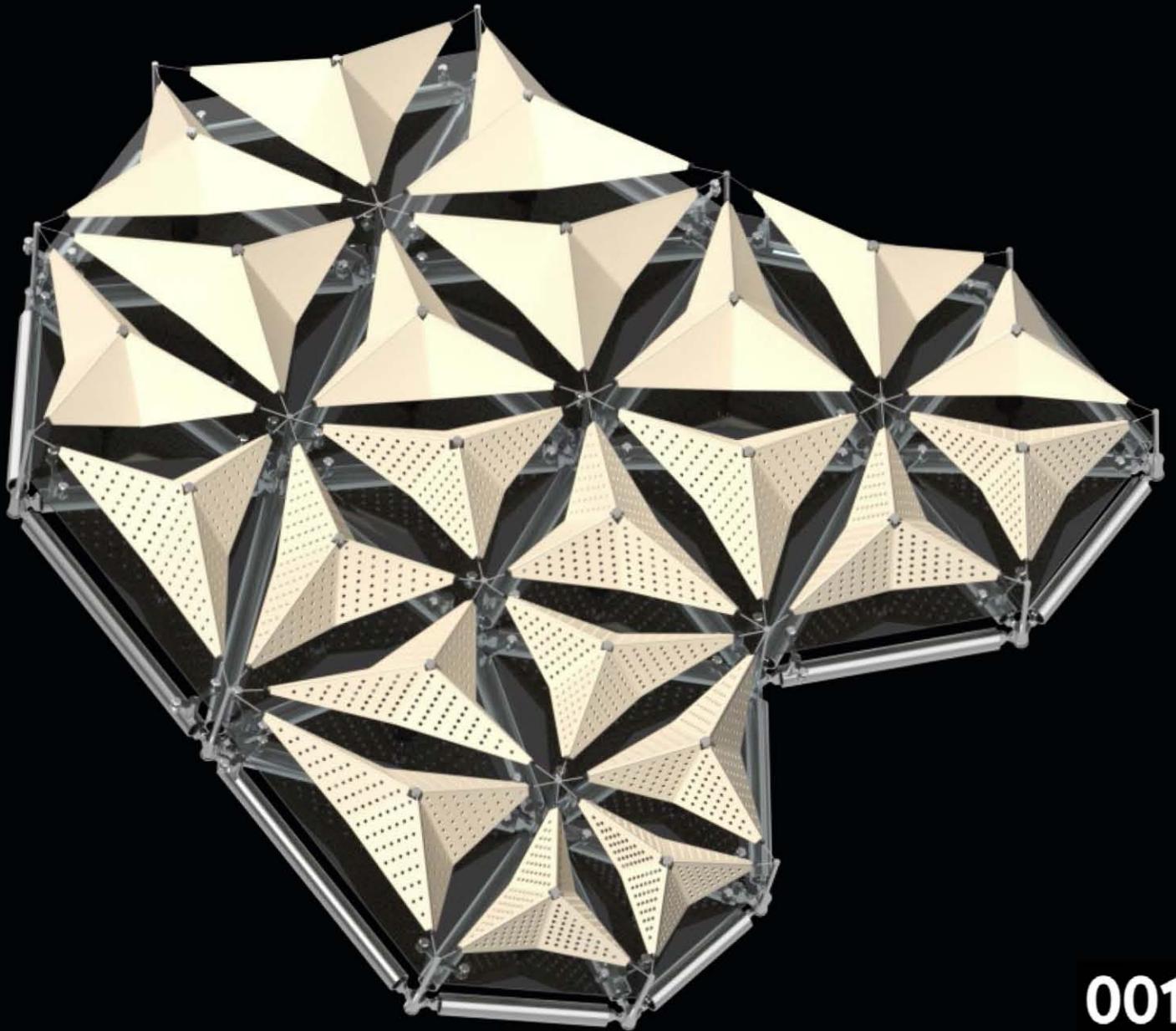
Así mismo, este capítulo ha demostrado los beneficios de un trabajo interdisciplinario en el desarrollo de un proyecto de cubierta ligera, en el cual son importantes los estudios de forma, materiales y sistemas, tanto físicos como digitales.

Además, ha permitido vislumbrar las posibilidades de interconexión entre diversas herramientas digitales de desarrollo y análisis de proyectos geométricos, arquitectónicos y mecánicos.

Tras la realización de los diversos análisis presentados, es ahora posible proceder a la realización de planos arquitectónicos y constructivos de la "Cubierta habitable adaptable ante condiciones ambientales cambiantes", conociendo las fortalezas y debilidades de los sistemas, y garantizando el correcto funcionamiento de los detalles constructivos y geométricos, la correcta elección de los materiales y ensambles propuestos, la funcionalidad del sistema constructivo mediante barras y nodos creado, y el correcto comportamiento mecánico-formal de la estructura propuesta.

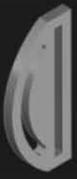
En el siguiente capítulo, las soluciones y resultados analizados y propuestos serán traducidos en un proyecto de cubierta, y sus planos correspondientes.

CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES



001

**CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE
CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES**



80x



19x



19x



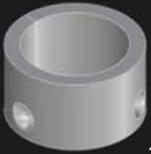
160x



38x



19x



23x



69x



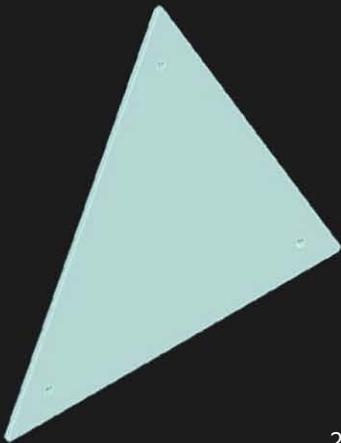
69x



23x



69x



23x



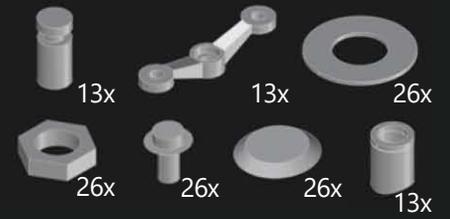
80x



160x



80x



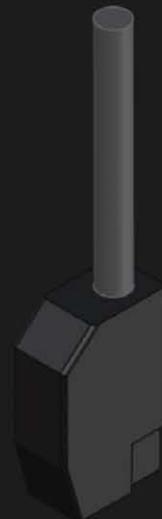
19x



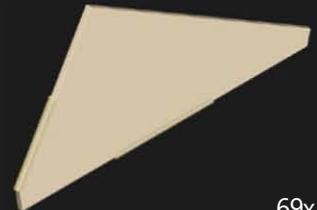
69x



41x



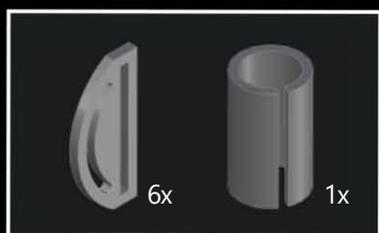
23x



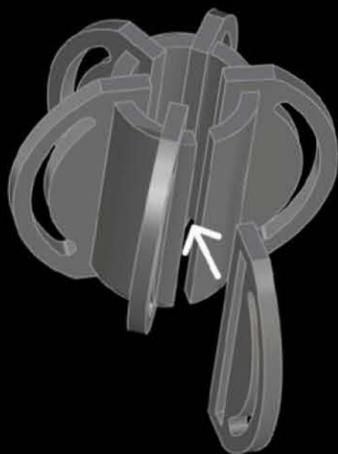
69x

1269 pc

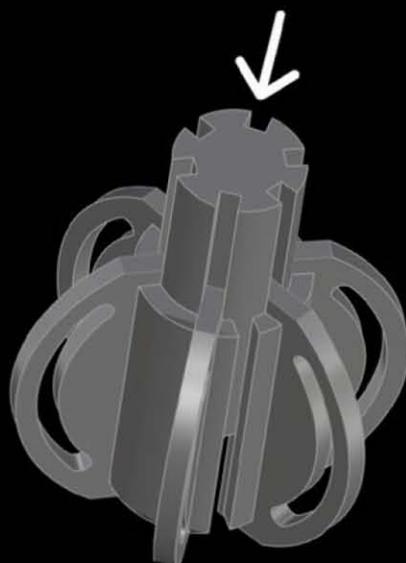
CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES



1

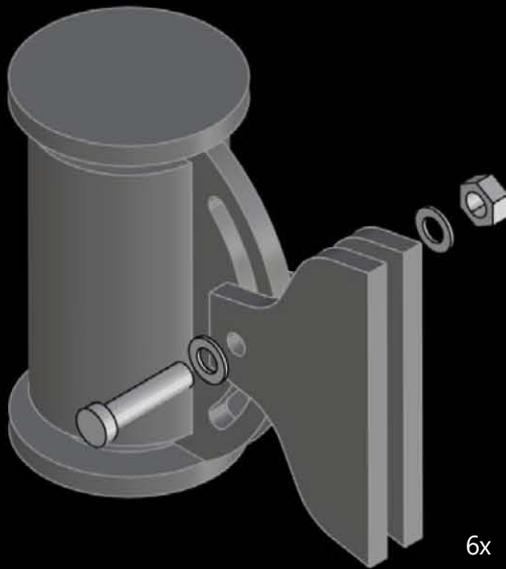


2





3



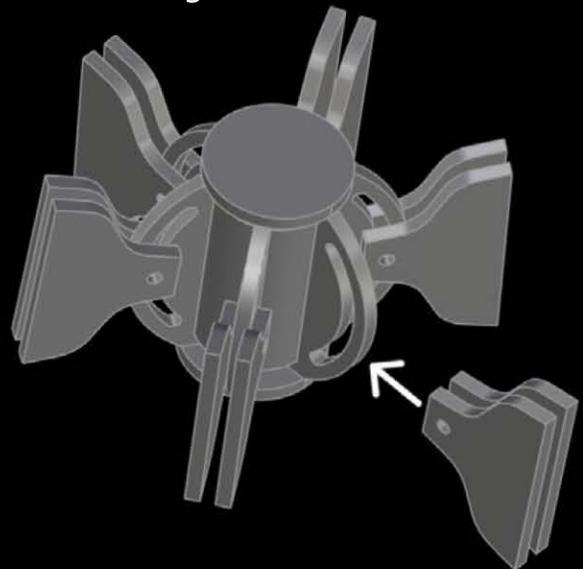
6x



4



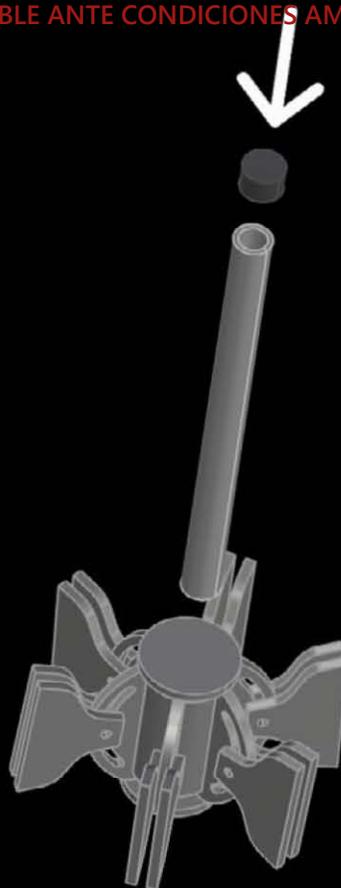
5



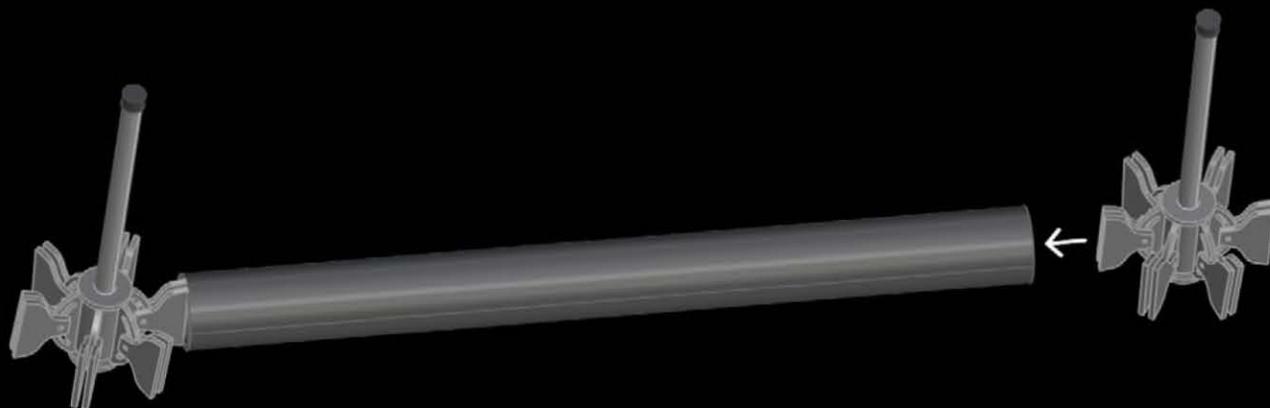
CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES

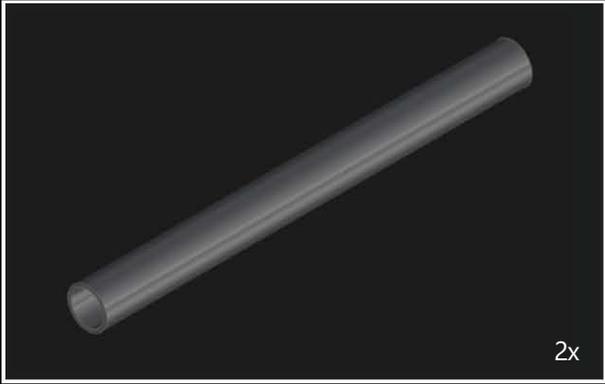


6

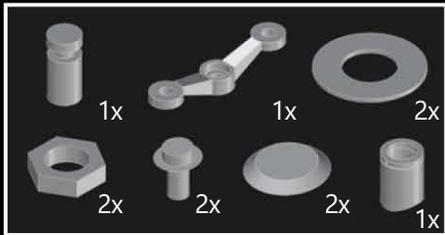


7





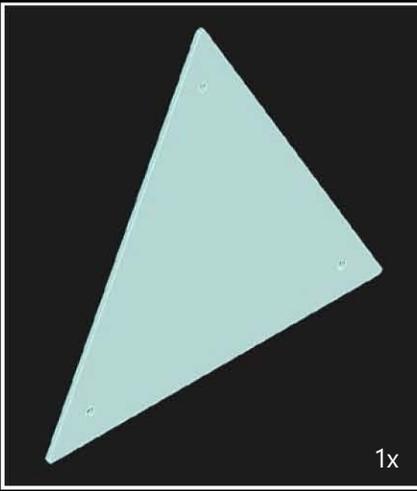
8



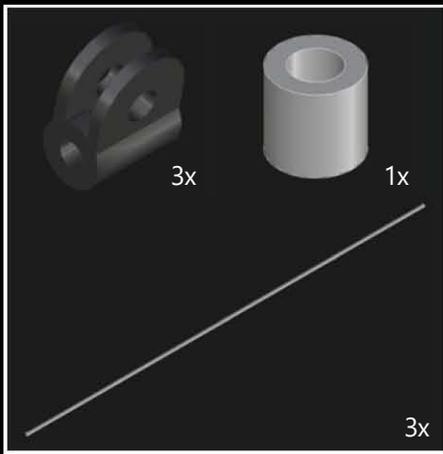
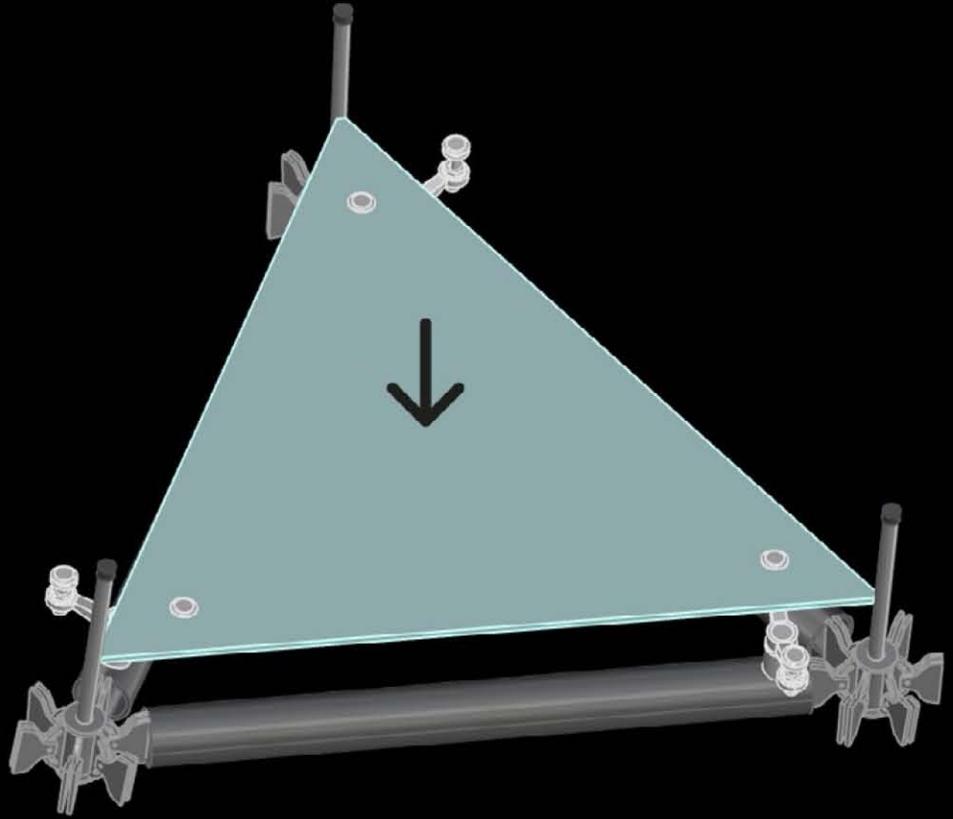
9



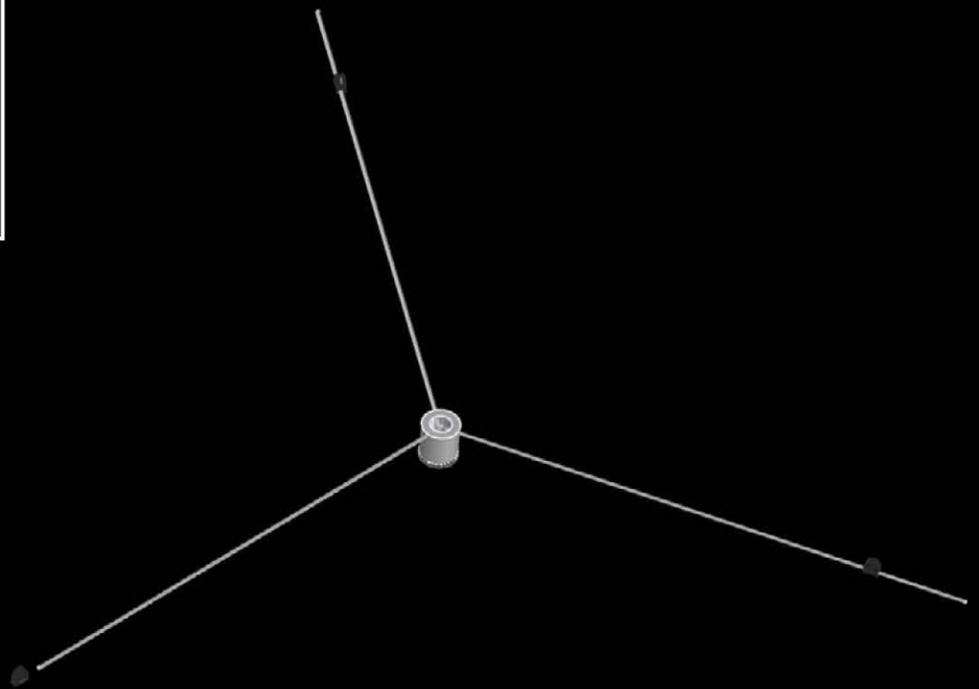
CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES

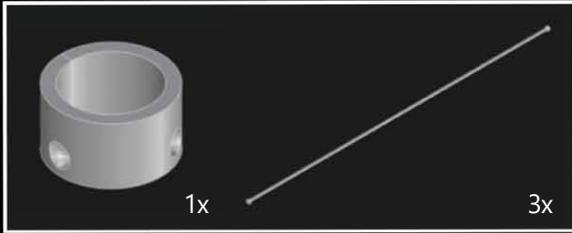


10

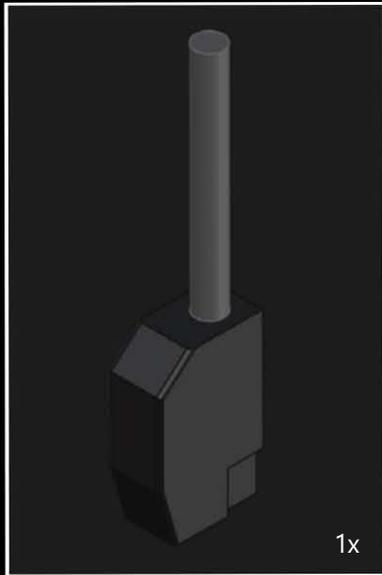
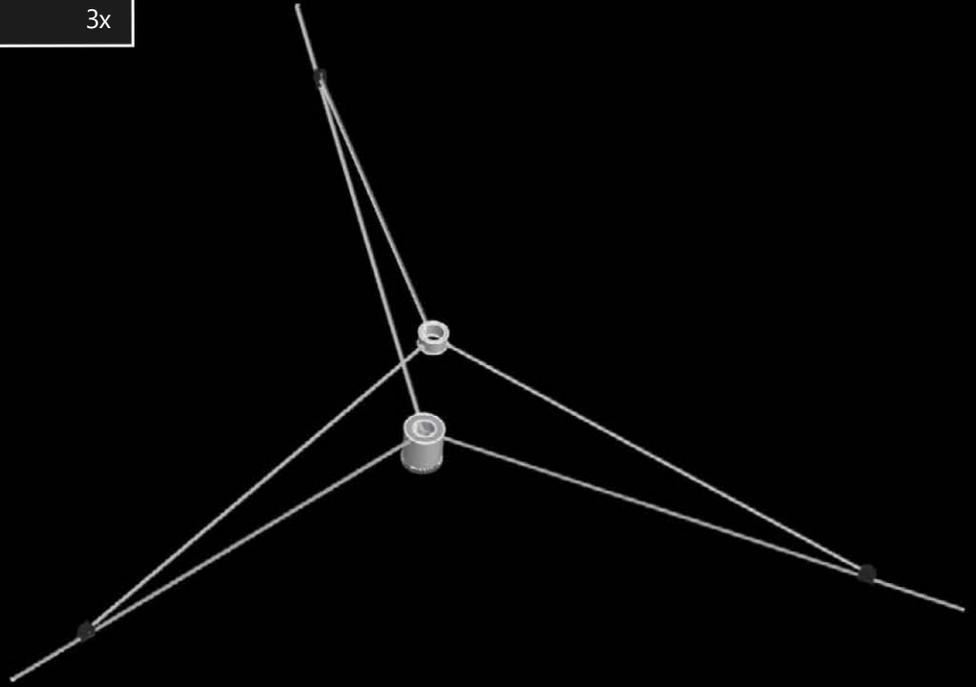
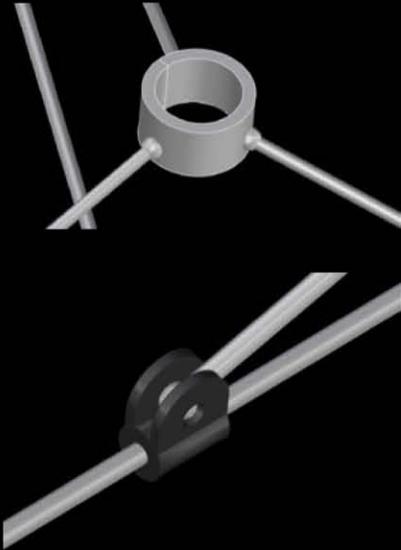


11

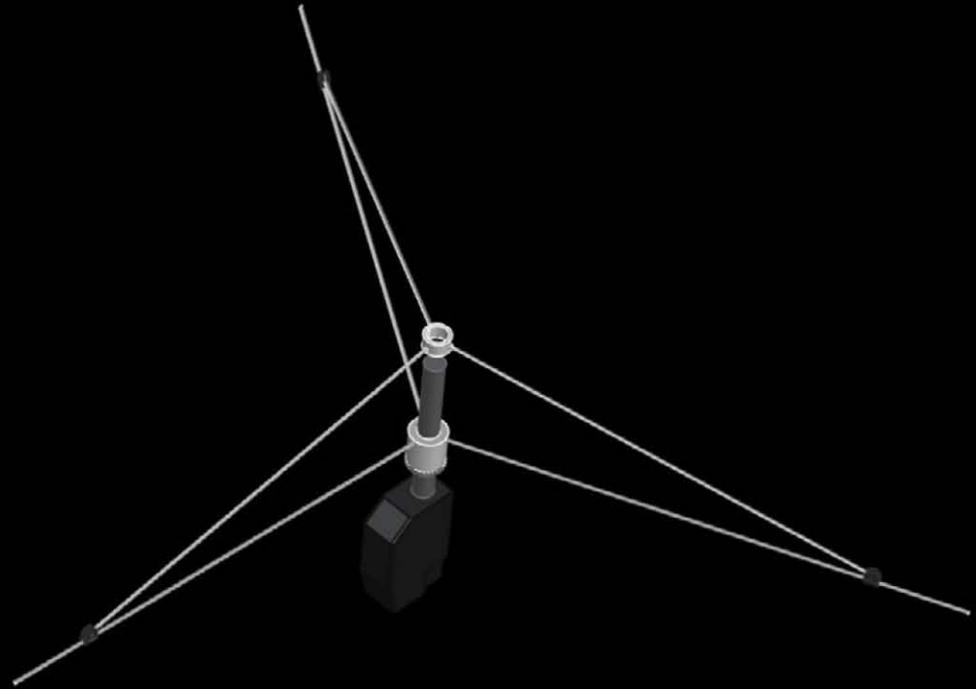




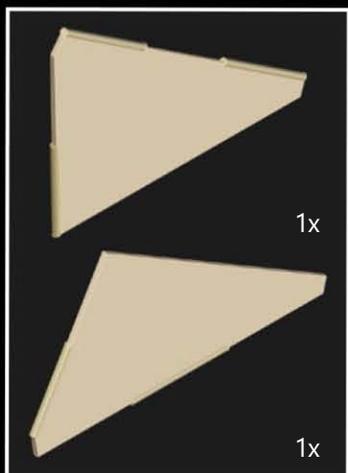
12



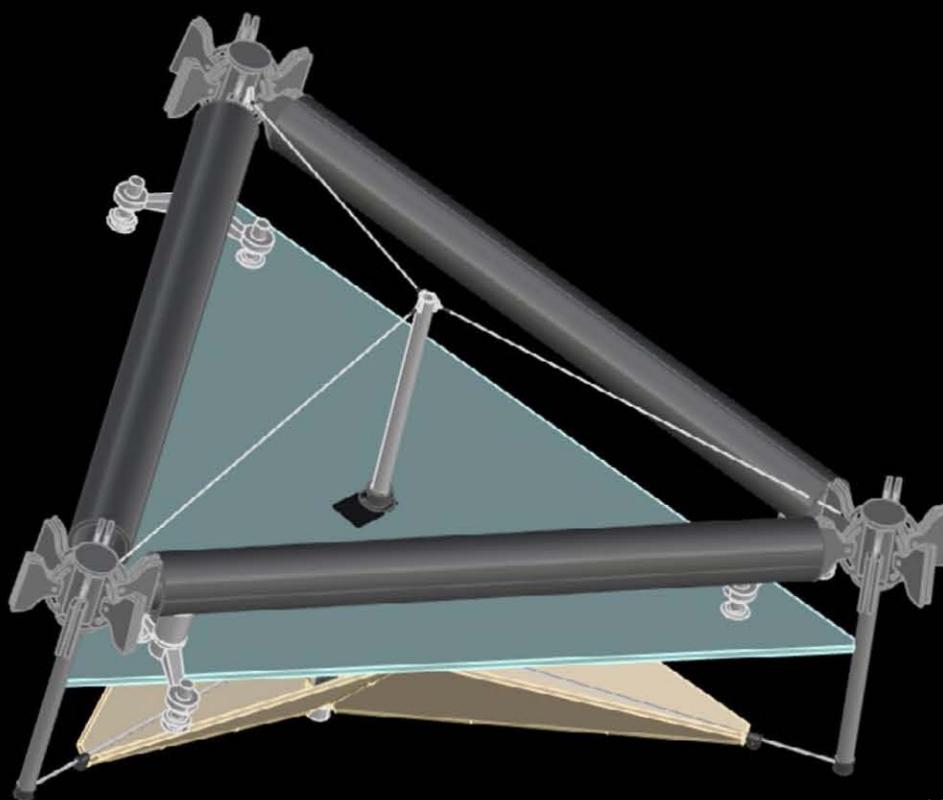
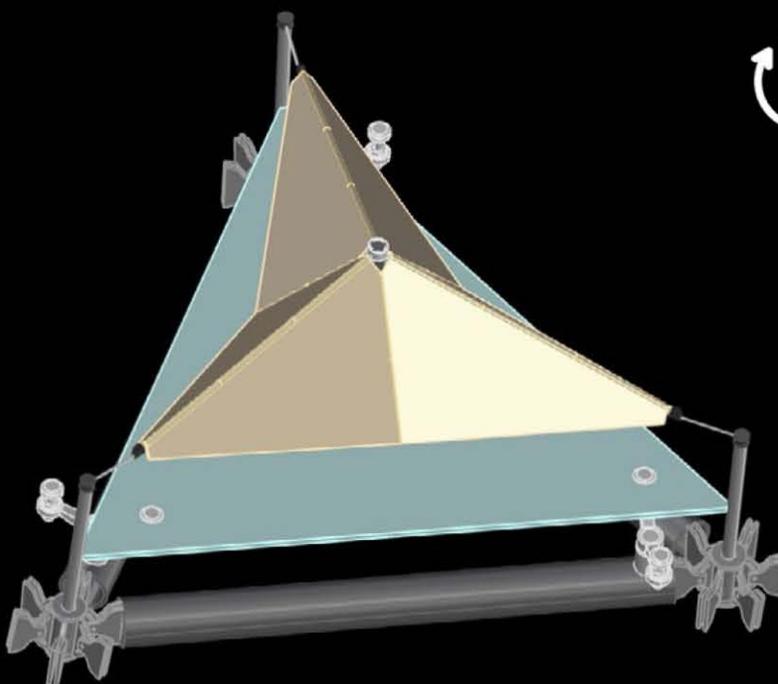
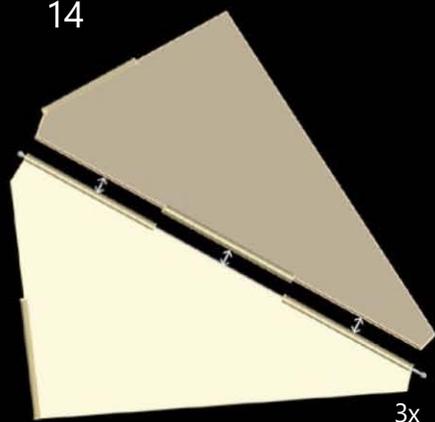
13

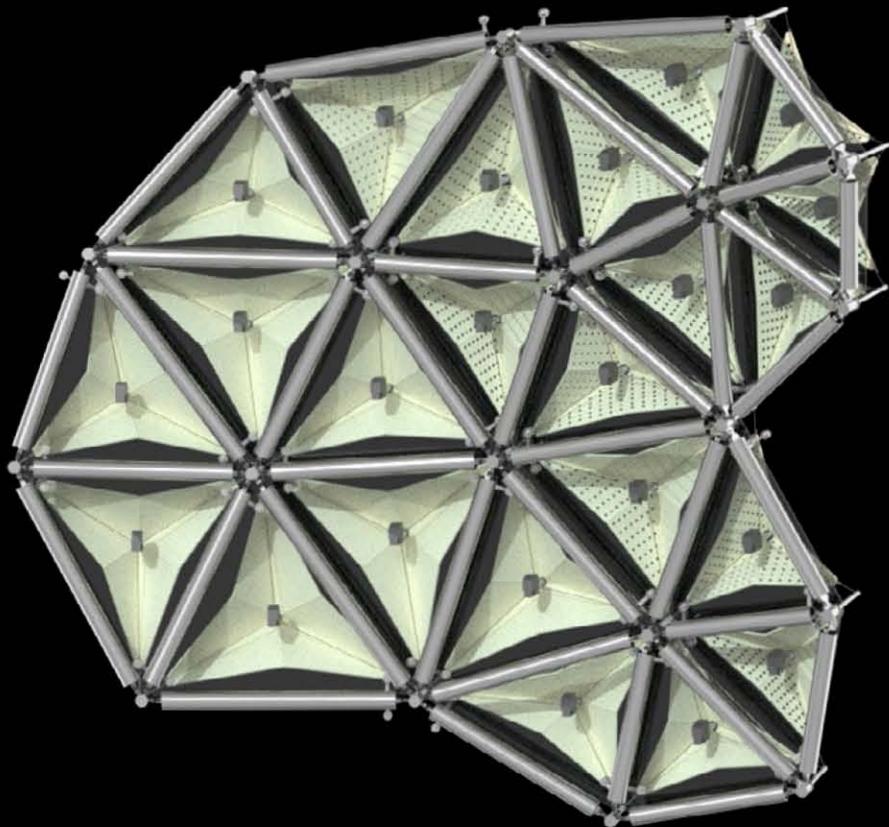
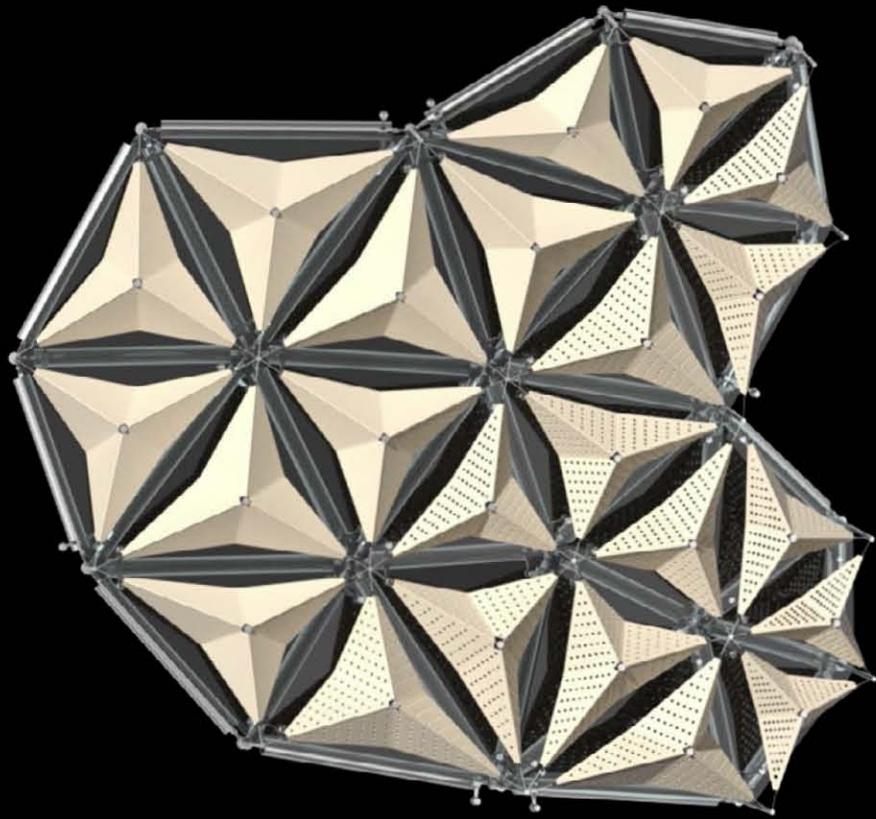


CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES

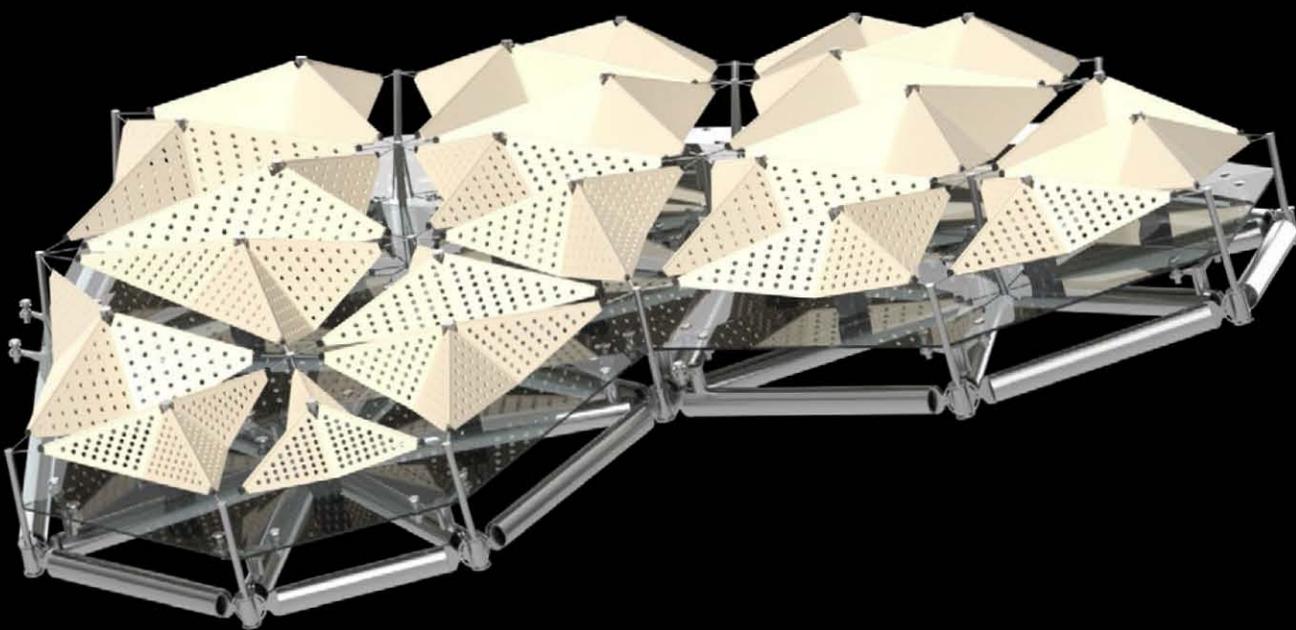
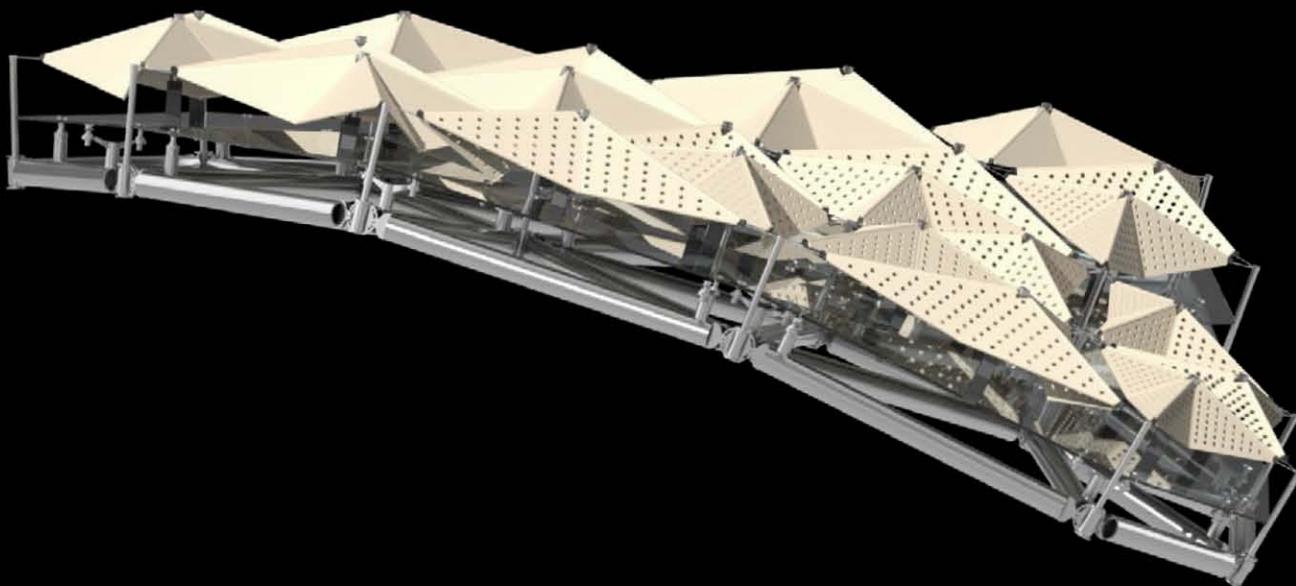


14

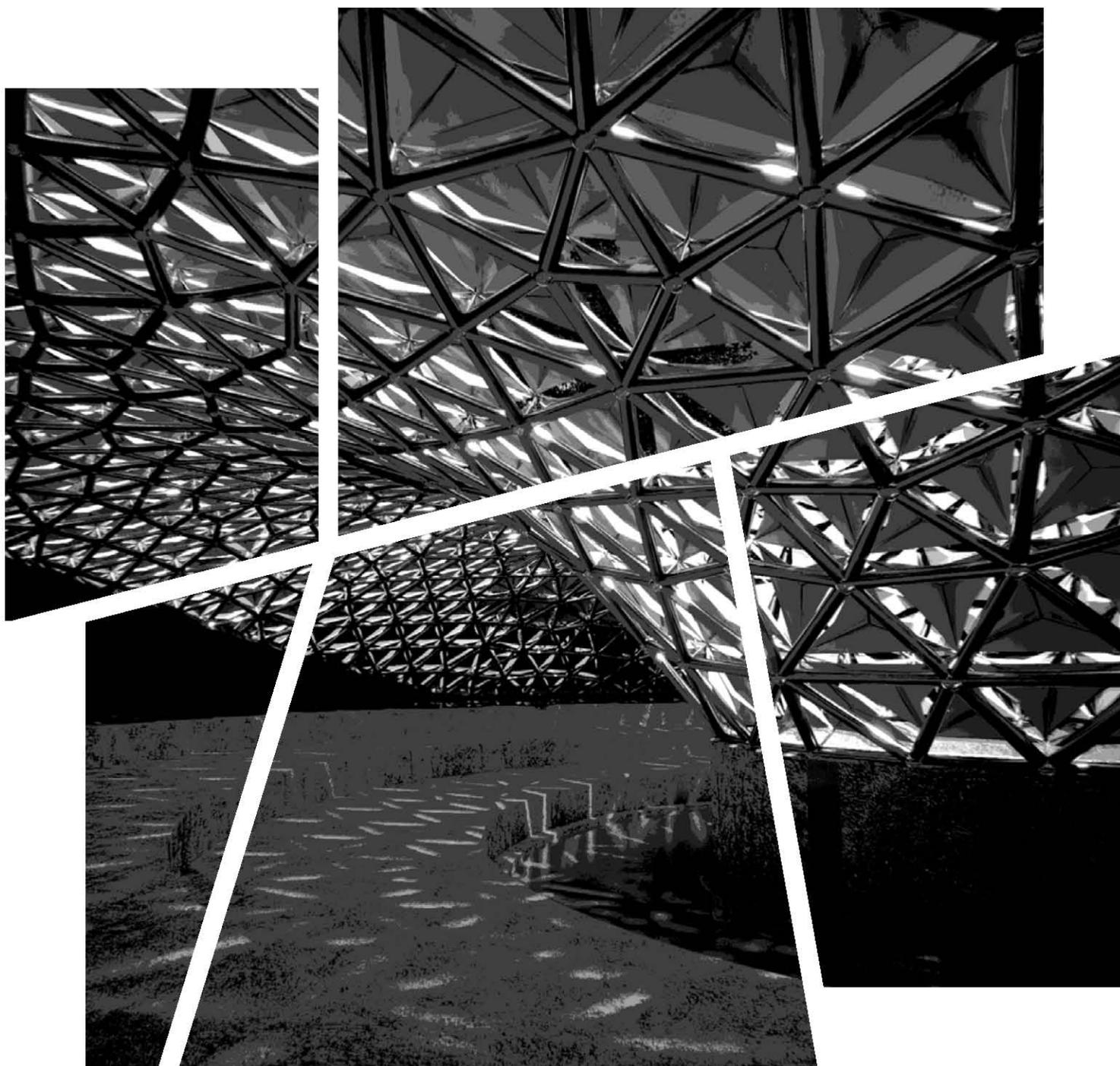




CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES



4. DISEÑO Y APLICACIÓN



El presente capítulo se enfoca en la exposición de las descripciones, planos, esquemas y materiales gráficos elaborados como propuesta de solución para la "Cubierta habitable adaptable ante condiciones ambientales cambiantes".

El proyecto se trata de un desarrollo académico y experimental, por lo que no se pretende la construcción próxima del mismo, sin embargo, se agregó una cantidad y calidad suficiente de planos para permitir el correcto entendimiento de la composición de los espacios, composición de la cubierta, sistema constructivo y los módulos mecanizados adaptables todo dentro una propuesta espacial compuesta.

Como se concluyó en el capítulo anterior la metodología permite por su proceso no lineal más bien iterativo, la adaptación y aplicación de ese conjunto de herramientas para comparar y encontrar soluciones capaces de cubrir la demanda de una cubierta a compresión pura compuesta de barras y nodos como sistema constructivo, hermética y adaptable ante condiciones variables del exterior.

Es así como se pudieron observar distintas opciones que cubrieran un programa arquitectónico específico con la justificación de observar y comprobar arquitectónicamente el sistema desarrollado con todas sus implicaciones. Dicho programa se desarrolló a la par de la metodología y será descrito a continuación.

4.1 ANTEPROYECTO ARQUITECTÓNICO ÁREAS Y USUARIOS

Al determinar el reto de albergar y refugiar a un grupo de 48 personas en subgrupos como pudieran ser 12 familias por un tiempo de 62 días mínimo, se pensó en zonas generales que a su vez estarían comprendidas en áreas que permitan su correcto funcionamiento y aprovechamiento por parte de los usuarios. Dichas familias están distribuidas en: 2 familias de 8 miembros, 2 familias de 5 miembros, 4 familias de 4 miembros, 2 familias de 2 miembros y 2 familias unipersonales, es decir, un solo miembro. (Fig. 42, pág. 75) Así mismo, las variables de número de personas, así como periodo de estadía dentro del espacio dieron pie a los cálculos e iteraciones de área total de cada espacio.

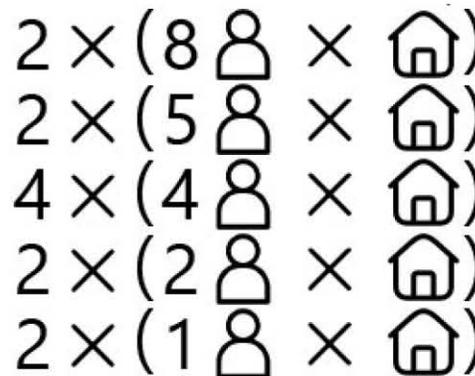


Figura 42: Esquema sintetizado de distribución para usuarios por familia y número de familias por grupo de habitantes para el total de 48. Propia. (2023)

Para retomar con la premisa de adaptabilidad y flexibilidad tanto de espacios como sistemas, se les otorgó a las zonas generales etiquetas según qué tan necesarios son para el adecuado funcionamiento de la cubierta a lo largo de un periodo de tiempo mayor al de los 62 días propuestos como un sistema en sí mismo.

Las zonas generales están comprendidas por: Zona de módulos de vivienda (temporal), zona de almacenamiento de insumos (temporal), zona de cultivo (opcional), zona de energía (siempre necesaria), zona de control y automatización (siempre necesaria) y tratamiento de residuos (temporal).

Dichas zonas serán desglosadas a continuación junto con los espacios que las comprenden.

ZONA DE MÓDULOS DE VIVIENDA

El área de esta zona se determinó de acuerdo con la creación de un módulo de 3 m x 3 m como unidad mínima a partir de la cual partir para configurar el resto de ellos de acuerdo con el tamaño de la familia a albergar en su interior. (Fig. 43, pág. 76)

Así mismo se dotó con 20 m² por persona al exterior de los conjuntos. Se diseñaron con el fin de ser modulares, ensamblables y reconfigurables. Es por ello por lo que se tratan de piezas tubulares y coples de 90° de PVC, de 4" y de 1 m x 1 m de distancia nodal con divisiones textiles previamente vulcanizadas de polietileno tensadas con patrones de unión tipo macho – hembra, es decir que facilitan el ensamblaje y correcta segmentación de espacios cuando se encuentran con otras piezas. (Fig. 44, pág. 76)

Todos los módulos de vivienda cuentan con espacio para dormitorio, baño con instalaciones sencillas y aparentes, estancia/comedor, cocina con parrilla eléctrica y un tanque de agua individual con volumen contenedor en función de la cantidad de personas a suministrar.

El número de servicios aumentó naturalmente, en relación directa con el número de habitantes. De acuerdo con el número de habitantes por familia, es que con ayuda del módulo mínimo de 3 m x 3 m, se llevó a cabo la configuración del módulo como conjunto con los espacios anteriormente mencionados.

Dando como resultado áreas con superficie de: Familia de 8 personas – 57 m², Familia de 5 personas – 39 m², Familia de 4 personas – 33 m², Familia de 2 personas – 27 m² y Familia unipersonal – 27 m². (Fig. 45, pág. 76)

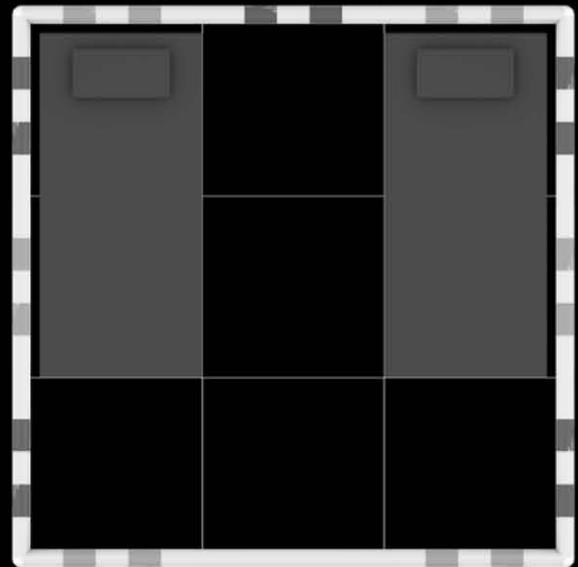
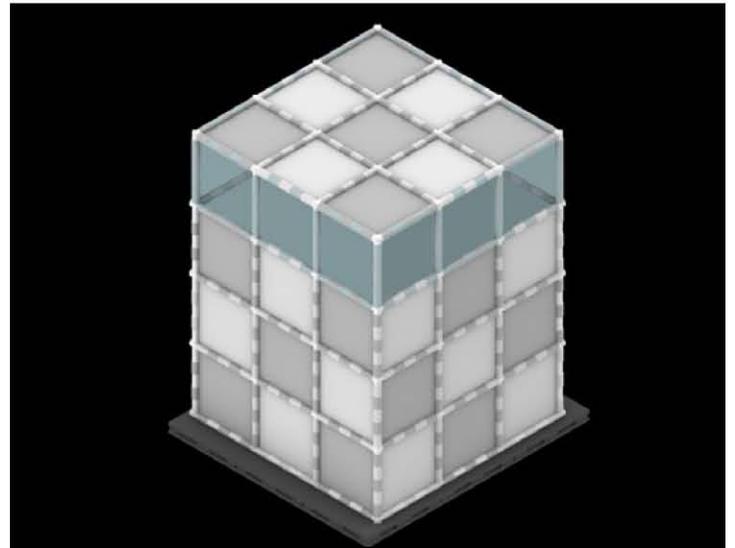


Figura 43: Módulo mínimo de vivienda 3 x 3 m. Propia. (2023)

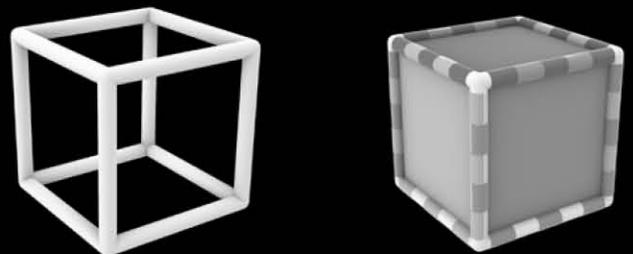


Figura 44: Izq. Alma de módulo de PVC de 4" con distancia nodal de 1 m. Der. Módulo con cubiertas textiles. Propia. (2023)

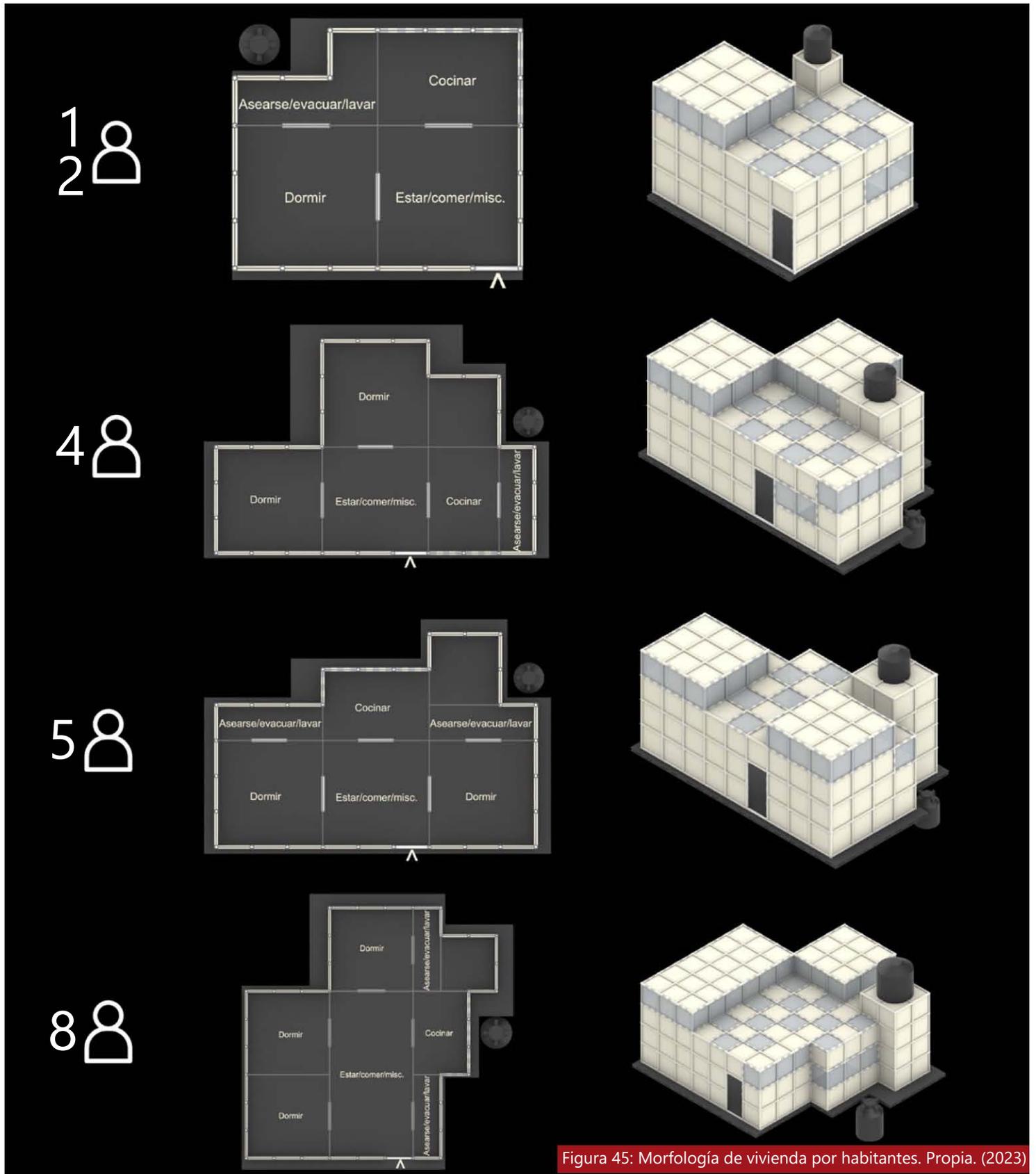


Figura 45: Morfología de vivienda por habitantes. Propia. (2023)

ZONA DE ALMACENAMIENTO

Está comprendida por dos espacios de guardado de todos aquellos productos para consumo del usuario, es decir, alimentos y bebidas en distintas presentaciones. Se planteó disponer de una bodega de consumibles en seco a temperatura ambiente. Ésta debía ser altamente práctica y organizada para almacenar raciones y contenedores debidamente. Por otro lado, se propuso una bodega fría en donde fuera posible almacenar en frío o incluso en congelación con una capacidad suficiente y cuidando equipos que tengan bajo consumo energético. Para el diseño y delimitación de metros cuadrados de dicha zona fue necesario calcular las raciones de comida y el agua necesaria tanto para hidratarla como para el consumo cotidiano por persona en un periodo de 62 días.

El consumo calórico por persona al día asciende a las 1,800 calorías, repartido a lo largo de 3 comidas. Siendo entonces que hay 48 personas al interior del conjunto por un periodo de 62 días el consumo calórico total de los usuarios es de 5,356,800 calorías en toda su estadía. Se optó por resolver el requerimiento de alimentación con porciones de suministro de emergencia de la marca Readywise importadas y con existencia a nivel nacional. Se investigaron las cantidades disponibles y se eligió la presentación de tarima de 36 cubetas conteniendo un total de 4320 porciones con un total de 913,440 calorías. (Fig. 46, pág. 77)

Para cubrir la demanda completa de los usuarios fueron requeridas 6 tarimas con dimensiones de 1.24 m x 0.96 m x 0.8 m cada una, ocupando un área individual de 1.20 m² y total de 7.2 m².

El agua para consumo se sumó entre la demandada por el hecho de hidratar las porciones de alimento con el requerimiento personal mínimo recomendado por la Organización Mundial de la Salud de 3 litros al día.

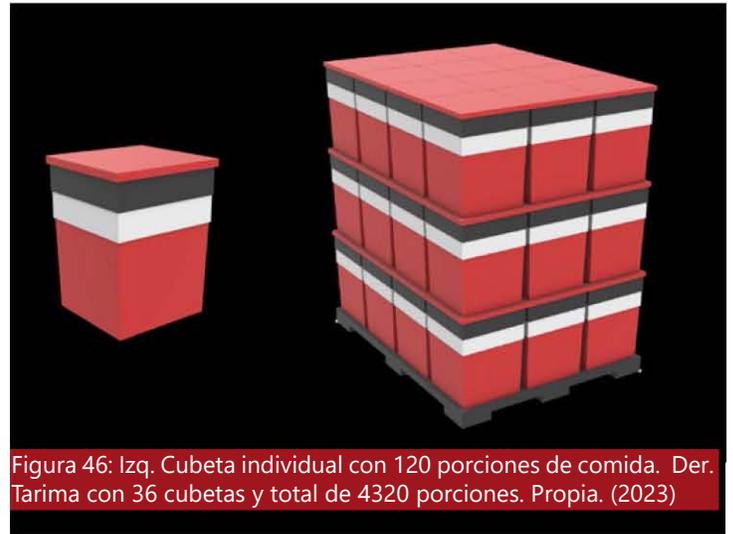


Figura 46: Izq. Cubeta individual con 120 porciones de comida. Der. Tarima con 36 cubetas y total de 4320 porciones. Propia. (2023)

En donde una tarima requiere de 4,320 tazas de agua (250 ml por taza) con un total de demanda de 1022.06 litros. Para completar la cantidad para las 6 tarimas se necesitan almacenar 6,132.36 litros. Mientras que por los 48 habitantes en el periodo de tiempo de 62 días con un consumo mínimo recomendado de 3 litros al día se calcula un total de 9,129.6 litros. Dando como resultado el reto de almacenar 15,261.96 litros para consumo. Se eligió un contenedor con capacidad de 1000 litros con dimensiones de 1.23 m x 1.01 m x 1.15 m IBC con rejilla metálica marca ALVEO o similar. (Fig. 47, pág. 77) Repartiendo 6 contenedores para hidratación de alimentos con área de desarrollo de 7.45 m² y 9 más para consumo directo diario con área de 11.18 m², obteniendo un requerimiento de 18.63 m².



Figura 47: Contenedor reforzado de 1000 l. Propia. (2023)

ZONA DE CULTIVO

Se planteó designar un área en donde los usuarios tuvieran la posibilidad, retomando el concepto de producción de suministros, su consumo y posterior reutilización y/o regeneración de dichos recursos, cultivar de forma sostenible diversos tipos de plantas para alimentarse. En principio se pensó en una zona con áreas designadas para cultivo tipo hidropónico y agrícola con preparación del suelo, sin embargo, para evitar un trabajo mayor y uso disminuir el uso de recursos, se optó por cultivos tipo aeropónicos.

El cultivo aeropónico supone el crecimiento de las plantas por medio de la irrigación por micro goteo distribuido verticalmente a través de un cuerpo cilíndrico en donde las plantas están colocadas en contenedores individuales inclinados a 30° y diámetro de 3 m. El contenedor multi perforado otorga la posibilidad de que las raíces del cultivo salgan a través de los huecos y estén suspendidos en el aire hacia el interior del cilindro. El cilindro de 0.35 m de diámetro x 2 m de altura se conecta a un contenedor en la base de 1 m de diámetro x 0.5 m de altura. En éste se encuentra alojado una bomba y un temporizador que leen los datos de sensores de temperatura, humedad y luz en las plantas y provocan que cuando es requerido al analizar estas variables el sistema suba agua a través del cuerpo cilíndrico y por aspersión las microgotas irrigen las raíces de las plantas. (Fig. 48, pág. 78) La implementación de este sistema aumenta la capacidad de cultivo en un área menor al incentivar el crecimiento vertical, así como el ahorro de agua al otorgar solo lo necesario y cuando realmente la planta lo requiere.

Se destinó un área de 255.82 m² para albergar un total de 96 pilares para probar con distintos tipos de cultivos aptos para la aeropónica como son: Lechuga, coles, kale, tomates, pimienta, chiles, pepinos, espinacas, cilantro, frijol, chícharo y rábanos.

Para todas las zonas fue necesario reflexionar qué tipo de módulos mecánicos adaptables automatizados estarían presentes sobre la cubierta, sin embargo, en éste en particular fue crucial para obtener la máxima eficiencia energética y crear un microclima idóneo. Con el fin de procurar un crecimiento de los cultivos al interior del conjunto. Dicha distribución de tipos de módulos se detallará más adelante en el capítulo dentro del desarrollo de propuesta de mecanización.

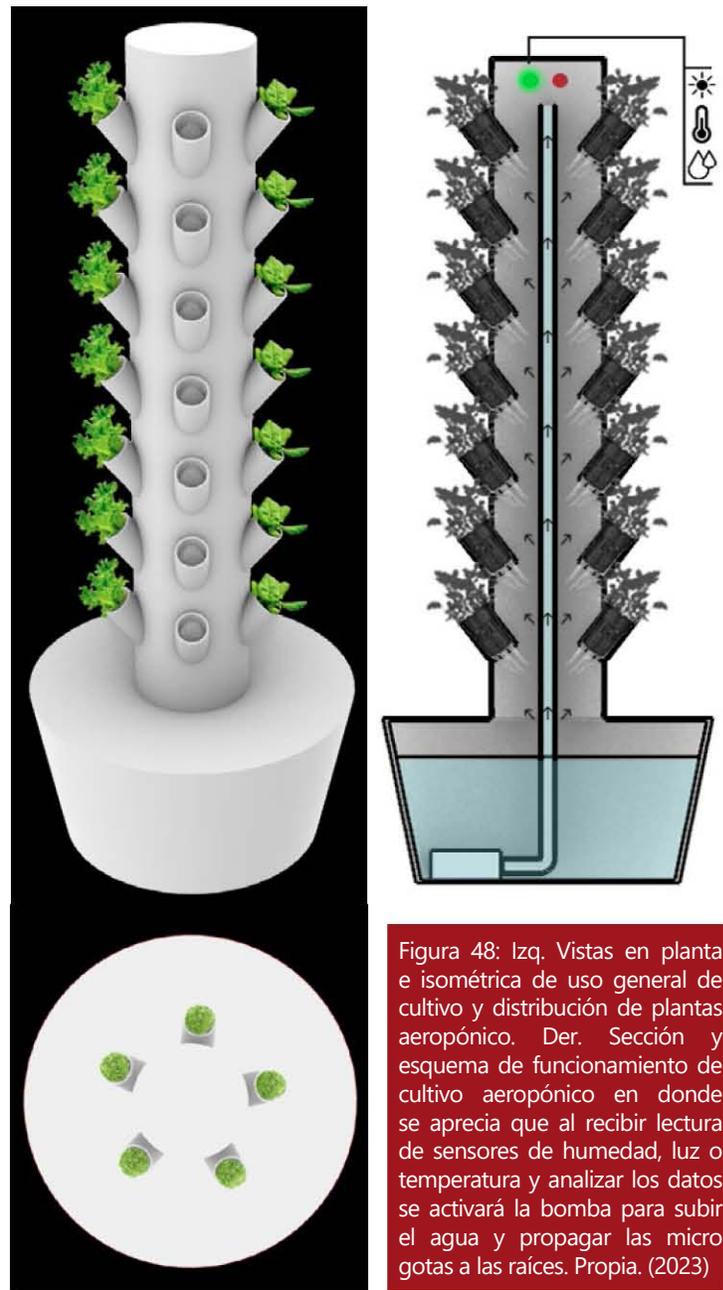


Figura 48: Izq. Vistas en planta e isométrica de uso general de cultivo y distribución de plantas aeropónico. Der. Sección y esquema de funcionamiento de cultivo aeropónico en donde se aprecia que al recibir lectura de sensores de humedad, luz o temperatura y analizar los datos se activará la bomba para subir el agua y propagar las microgotas a las raíces. Propia. (2023)

ZONA DE ENERGÍA

Las áreas que comprenden esta zona están determinadas por tres diferentes usos y ciclo del tratamiento que se le dará a la energía para el adecuado funcionamiento de los sistemas presentes en el conjunto y la cubierta. El ciclo que precisa son los de generación, almacenamiento y distribución. Para establecer la superficie a destinar dentro del proyecto para este uso, fue necesario definir los objetos y sistemas que requieren energía para funcionar y posteriormente calcular el consumo con respecto a un tiempo determinado como se puede observar en la tabla 1.

Como se observa en la tabla, el consumo asciende a los 446 kW/h al día, en donde 18.58 kW equivaldrían a una hora de consumo. Se determinaron valores de gasto energético de 5.6 kW/h por cada metro cuadrado en función de los sistemas presentes dentro y fuera de la cubierta, así como el de la implementación de paneles con celdas fotovoltaicas con capacidad individual de 1.3 kW. Siendo así, los 446 kW/h de consumo por día se multiplicó por 365 días obteniendo 162,790 kW/h para dividirlo entre 2 en función de la obtención de un valor con el supuesto de poder obtener luz solar de 12 horas, obteniendo un total de 81,395 kW/h.

Se dividió entre el requerimiento de gasto por metro cuadrado de cubierta de 5.6 kW/h dando como resultado 14,534.82. Este valor se dividió entre 1,300 la cual es la capacidad de un panel con celdas fotovoltaicas calculando que se requieren un total de 12 paneles para obtener la máxima capacidad energética al estar desconectado de la red eléctrica local.

Se determinó el uso de paneles de marca Evans de distribución nacional en donde se cuenta con un producto que tiene la capacidad de 5kW sustituyendo así los 12 del cálculo inicial a solo 4 con dimensiones de 196.9 cm x 114 cm x 3.5 cm, a su vez cuenta con inversor integrado para transformar la energía proveniente de las celdas para su uso y almacenamiento con dimensiones de 43.60 cm x 72.80 cm x 22 cm, siendo requerido 4 de estos.

Para finalizar se calculó la obligación de usar baterías de litio recargables con capacidad de 24 V y 1,000 amperes con dimensiones individuales de 48 cm x 40 x cm x 13 cm. En donde por su capacidad serán requeridas 60 baterías para almacenar lo equivalente a 12 horas o medio día de energía, suponiendo su uso por parte de los usuarios cuando no haya luz solar disponible.

Tabla 1: Gasto energético de equipo presente en el proyecto

Descripción equipo	Cantidad de gasto	Unidad	Tiempo	Subtotal I	Unidad	Número de equipos	Subtotal II	Unidad		
Faro LED para luces generales	18	w	12 hrs	0.22	kW/h	1000	220	kW/h x día		
Bombilla LED para luces al interior de módulos	8	w	12 hrs	0.1	kW/h	150	15	kW/h x día		
Parrilla eléctrica	1500	w	3 hrs	4.5	kW/h	12	54	kW/h x día		
Tira LED de 10 m en cultivo	5	w	8 hrs	0.04	kW/h	384	15.36	kW/h x día		
Microcontrolador ARDUINO UNO	5	w	24 hrs	0.12	kW/h	1000	120	kW/h x día		
Bomba de agua de 1.5 hp agua potable	0.28125	w	24 hrs	1.125	kW/h	2	2.25	kW/h x día		
Bomba de agua aeroponia	31	w	0.5 hrs	0.02	kW/h	96	1.92	kW/h x día		
Congelador industrial	350	w	24 hrs	8.4	kW/h	2	16.8	kW/h x día		
Total								445.33	Unidad	
									kW/h x día	

Tabla 4: Gasto energético de equipo en el proyecto. Propia. (2023)

ZONA DE TRATAMIENTO DE DESECHOS

Se dividió en dos de acuerdo con tipo de desechos a ser generados dentro del conjunto, en este caso residuos sólidos y líquidos. En general esta zona debe permitir el compactar residuos no reciclables, compostar sólidos orgánicos reciclables y pensar en reusar líquidos, así como analizar la viabilidad de unir éstos junto con el agua pluvial guiada y recolectada con ayuda de la forma de la cubierta.

Se planteó el uso de compostadores con capacidad de 470 litros con dimensiones individuales de 80 x 80x 80 cm, en donde la única recomendación de uso y colocación es alejada de área de asentamientos, si bien cuentan con hermeticidad, puede despedir malos olores.

Para la reutilización de agua se designó el uso de plantas de tratamiento marca Rotoplas para retirar contaminantes en los desechos sanitarios para su reutilización o descarga sin alterar en gran medida la composición del suelo. Ello por medio de procesos anaerobios y aerobios pasando por varios filtros físicos y químicos con dimensiones totales de 9.3 m x 3.72 m y área de 34.59 m². (Fig. 49, pág. 80)

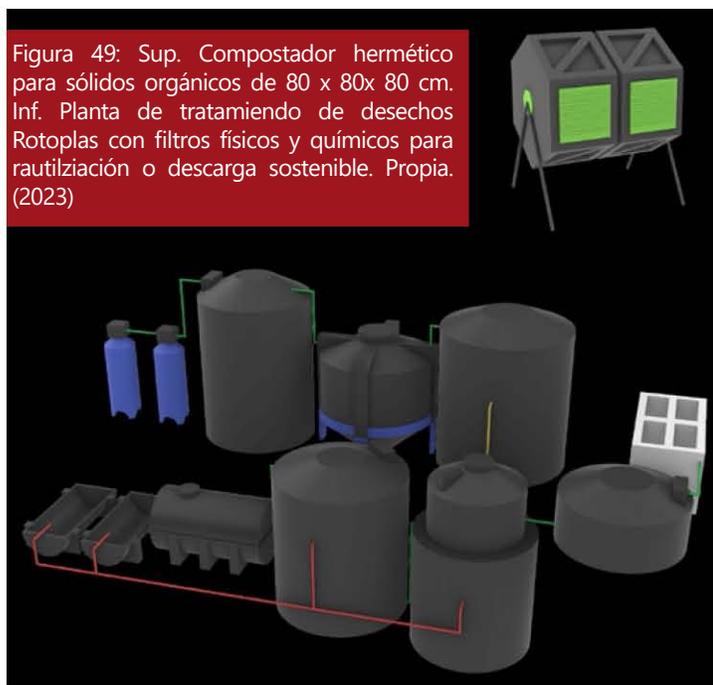


Figura 49: Sup. Compostador hermético para sólidos orgánicos de 80 x 80x 80 cm. Inf. Planta de tratamiento de desechos Rotoplas con filtros físicos y químicos para reutilización o descarga sostenible. Propia. (2023)

ZONA DE ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

Si bien la zona de tratamiento de desechos está ligada a la parte final del uso de agua potable, se planteó que siguiera un proceso cíclico para aprovechar al máximo este recurso. Para ello se calculó el uso de 200 litros por persona y en donde las familias de 8 miembros requieren de 1600 litros, 5 miembros de 1000 litros, 4 miembros de 800 litros, 2 y 1 miembro de 400 y 200 litros respectivamente. Es así como sobre los módulos de vivienda y colocado en la medida de lo posible sobre el área de servicios se debió colocar contenedores de agua en un rango de 0.85 m de diámetro y 1.6 m de altura para familias de 1 y 2 miembros, 1.10 m de diámetro y 1.40 m de altura para familias de 4 y 5 miembros y finalmente de 1.55 m de diámetro y 1.6 m de altura para familias de 8 personas. Dicho cálculo arrojó la implementación de un tanque elevado sobre el nivel de los contenedores antes descritos capaz de ser llenado vía agua pluvial y agua tratada proveniente de la planta de tratamiento. Con una capacidad de 7,500 litros que representa $\frac{3}{4}$ del servicio calculado de la suma de los contenedores por día con dimensiones de 3.10 m de altura y un diámetro de 2.20 m.

4.2 PROGRAMA, PLANOS Y VISUALIZACIONES ARQUITECTÓNICAS

El desglose y resumen de las zonas generales y áreas particulares que las componen pueden ser consultadas en la tabla 2.

Conociendo las superficies mínimas ocupadas por cada zona, se procedió a realizar un diagrama de funcionamiento, jerarquía y relaciones de áreas generales y particulares a estar presentes en el proyecto con el fin de identificar y analizar su correcto posicionamiento dentro de la cubierta atendiendo a las premisas de diseño anteriormente descritas en el capítulo. (Fig. 50, pág. 82-83)

Tabla 2: Zonas generales y áreas particulares componentes

Espacio	Actividad	Requisitos/Características	Contenido	Área requerida
Zona de módulos de vivienda				
Recámara	Dormir	Conjuntos modulares tubulares con divisiones textiles, expandibles y reconfigurables. Separados del suelo, rígidos solo en la base.	48 personas	432 m ²
Baño	Asearse/Evacuar/Lavar	Servicios e infraestructura con menor instalación/aparente		
Cocina	Cocinar	Servicios e infraestructura con menor instalación/aparente		
Estancia/Comedor	Estar/Comer/Misc.	Área de usos múltiples		
Zona de almacenamiento				
Tanque de agua	Almacenar y distribuir agua para viviendas	A mayor altura de áreas servidas, rellenar con H ₂ O pluvial al tratarse	7,500 l de agua	3.10 m h x 2.20 m d
Bodega	Almacenar consumibles	Práctico y organizado, raciones	6 tarimas y 15 contenedores	41.35 m ²
Bodega Fría	Almacenar insumos en frío/congelación	De capacidad suficiente y mínimo consumo energético	2 congeladores industriales	7.98 m ²
Zona de cultivo				
Aeropónica	Cultivar tomate, pepino, lechuga, etc.	Hibernadero con microclima y espacio para cultivo vertical	96 pilares de PVC	255.82 m ²
Agrícola	Cultivar tubérculos y semillas (Papa, maíz...)	Suelo agrícola preparado previamente, parcela	n/a	
Zona de energía				
Generación	Recibir energía de fuentes naturales renovables	Zona exterior de paneles fotovoltaicos y ventiladores eólicos	4 paneles exteriores	29.28 m ²
Almacenamiento	Convertir y almacenar la energía	Espacio cerrado y controlado con buena ventilación y sin luz solar directa	Inversores y baterías	4.89 m ²
Distribución	Repartir energía a todas las zonas en general	Espacio cerrado y controlado con buena ventilación y sin luz solar directa	Tableros de distribución	3 m ²
Zona de control y automatiz.				
Habitáculo de control de paneles	Controlar, revisar y mantenimientier módulos mecanizados adaptables automatizados	Sitio protegido y controlado, sólo revisión por experto en	Site con sistemas y PC	4 m ²
Habitáculo de control de conjunto	Revisar y mantener sistemas generales	Mismo caso para controles general y del resto de la infraestructura	Site con sistemas y PC	4 m ²
Zona de tratamiento de desechos				
Tramiento de sólidos orgánicos	Compactar y compostar	Alejado de zona de módulos de vivienda, accesible a los usuarios	4 compostadoras	2.56 m ²
Tratamiento de agua	Tratar H ₂ O para reuso o vertido sostenible	Pensar en unir aqua pluvial con aqua residual de viviendas antes de tratar	Planta de tratamiento	34.59 m ²
Zona de acceso				
Acceso	Entrar y salir	Posibilitar y garantizar la hermeticidad al conjunto, dentro de la cubierta	48 personas	n/a

Tabla 5: Zonas generales y áreas componentes. Propia. (2023)



Zona de módulos de vivienda

Zona de cultivo

Zona de energía

Zona de control y automatización

Zona de tratamiento de desechos

Zona de acceso

Vestíbulos

Aeropónica

Módulos d

Tratamiento de agua

Tanque de agua

Tratamiento de sólidos orgánicos

Vestíbulo I

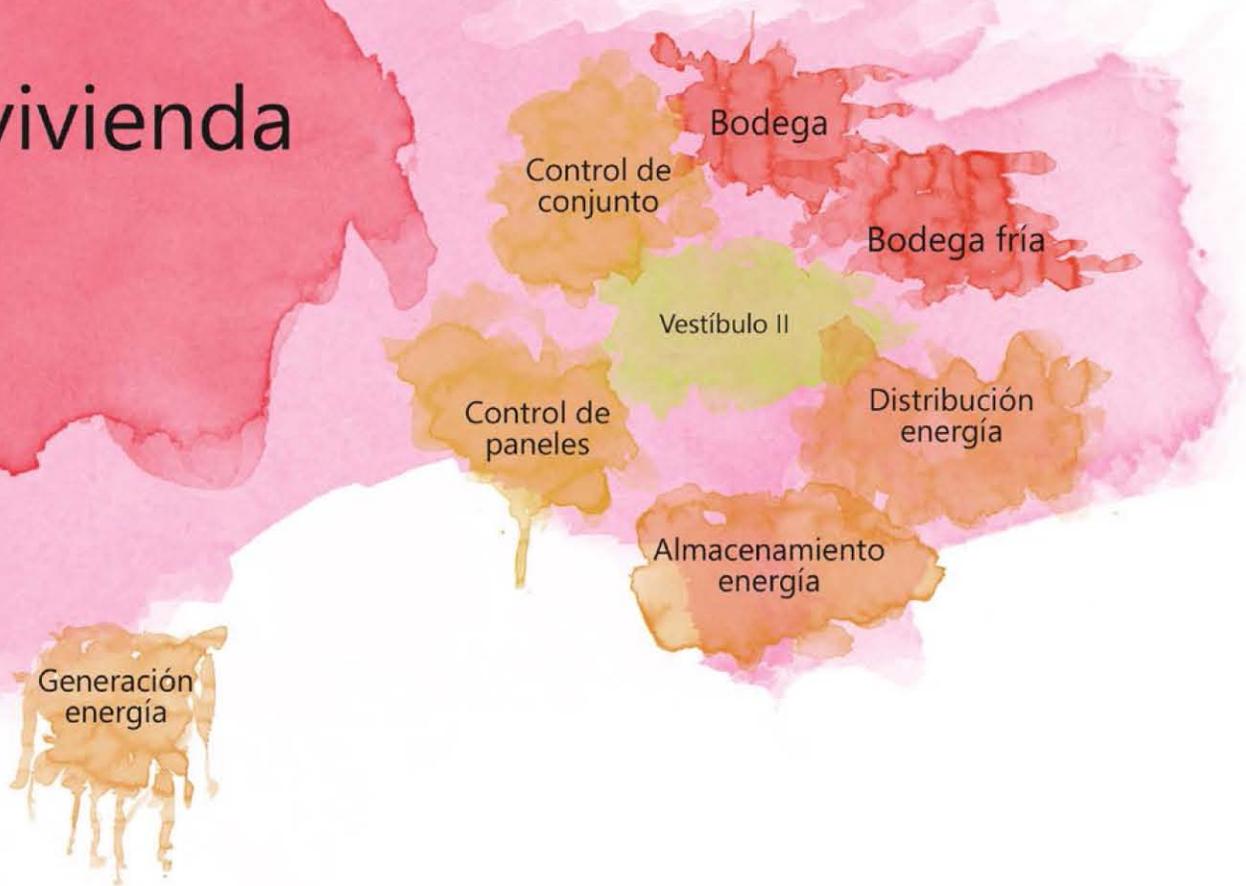
Tratamiento de agua

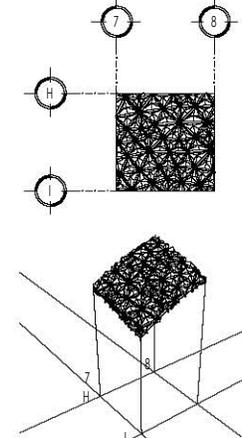
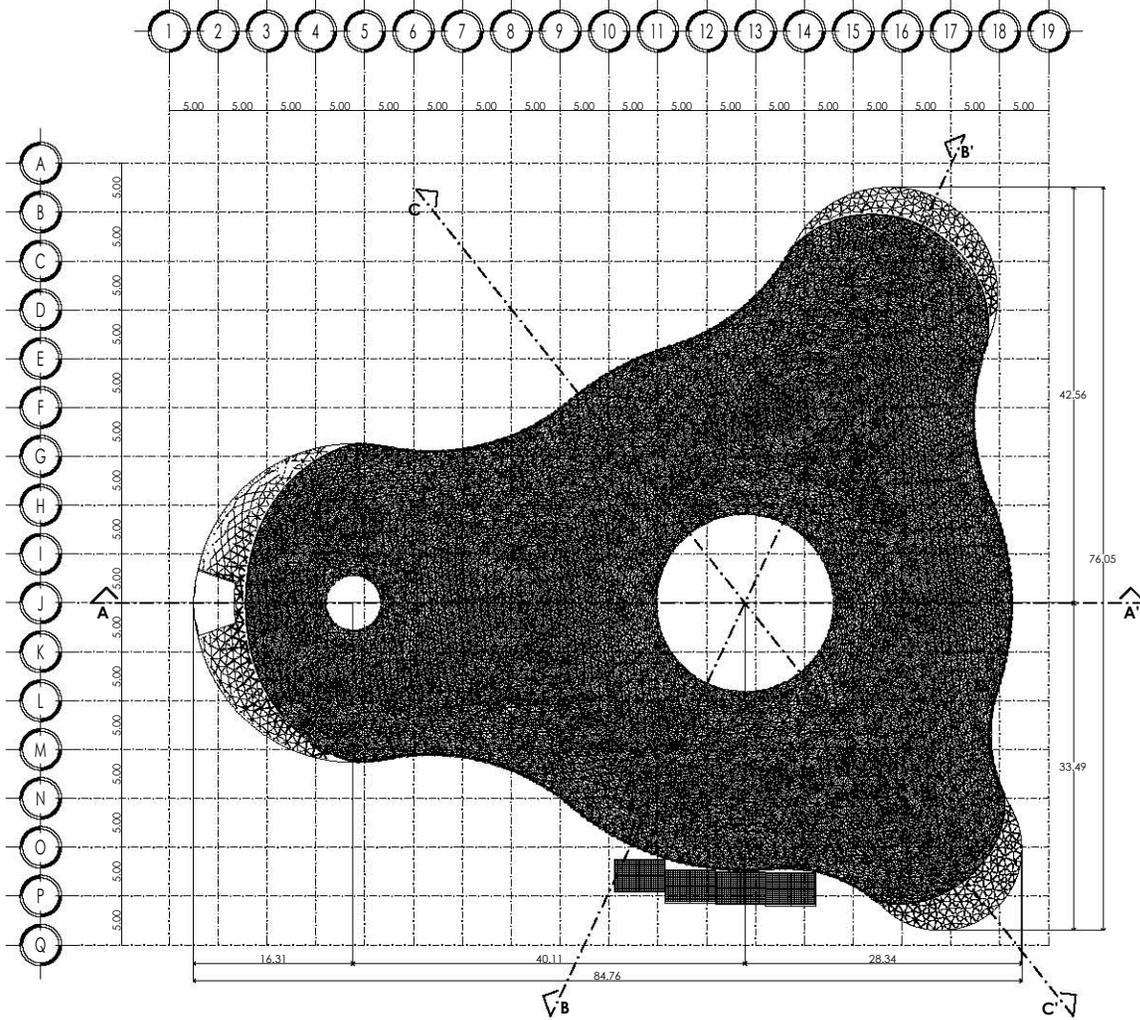
Acceso

CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES

Fig 50: Diagrama de zonas generales y áreas componentes. En donde cada zona pertenece a un color distinto y por lo tanto sus áreas. Se da lectura también a la proporción de tamaño de acuerdo a su área mínima estudiada. Y finalmente su disposición indica las relaciones que cada una tiene con otros espacios adecuados para su funcionamiento. Propia. (2023)

e vivienda

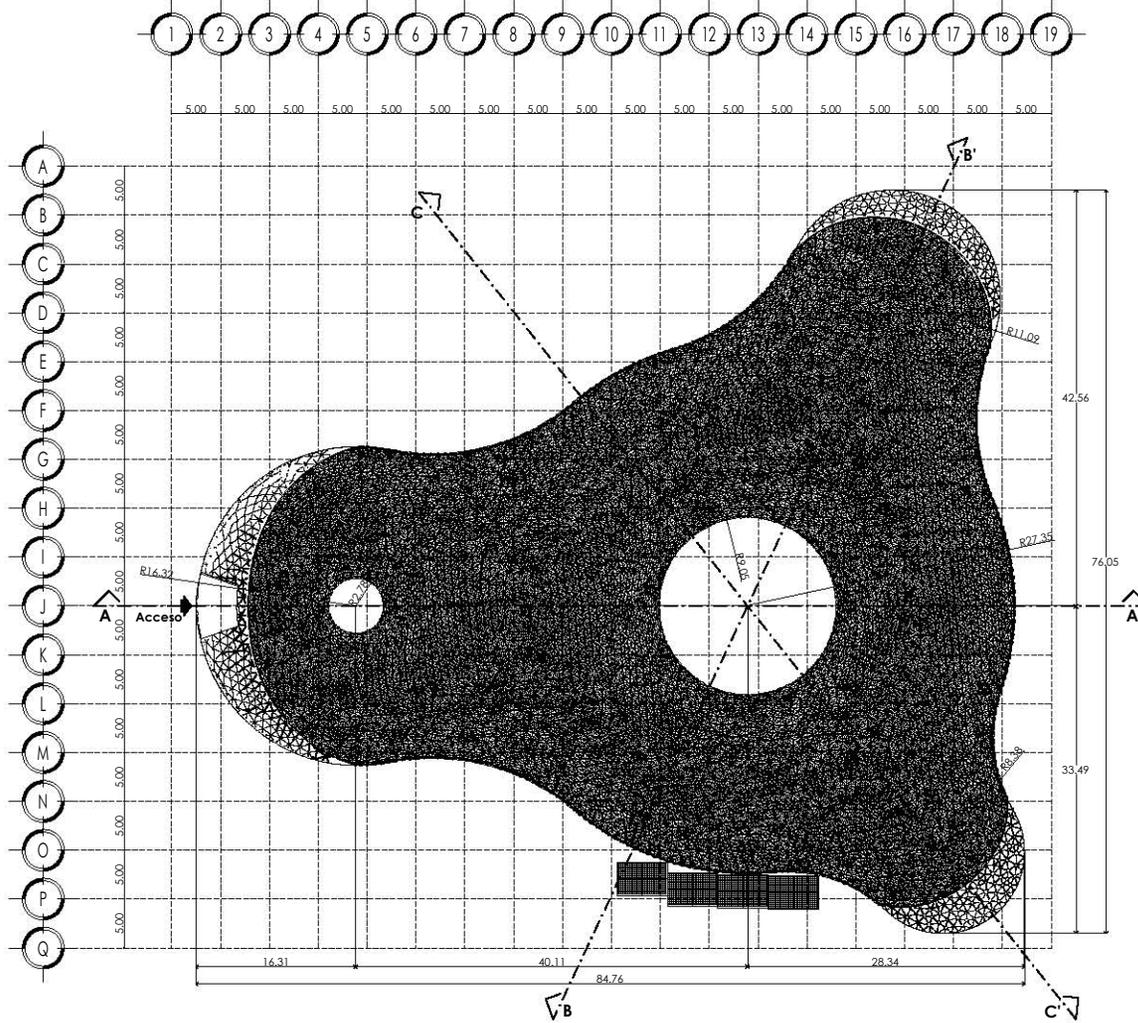




Planta e isométrico
ejemplo de lectura de
coordenadas
Esc. 1:250

Planta de ejes y
coordenadas

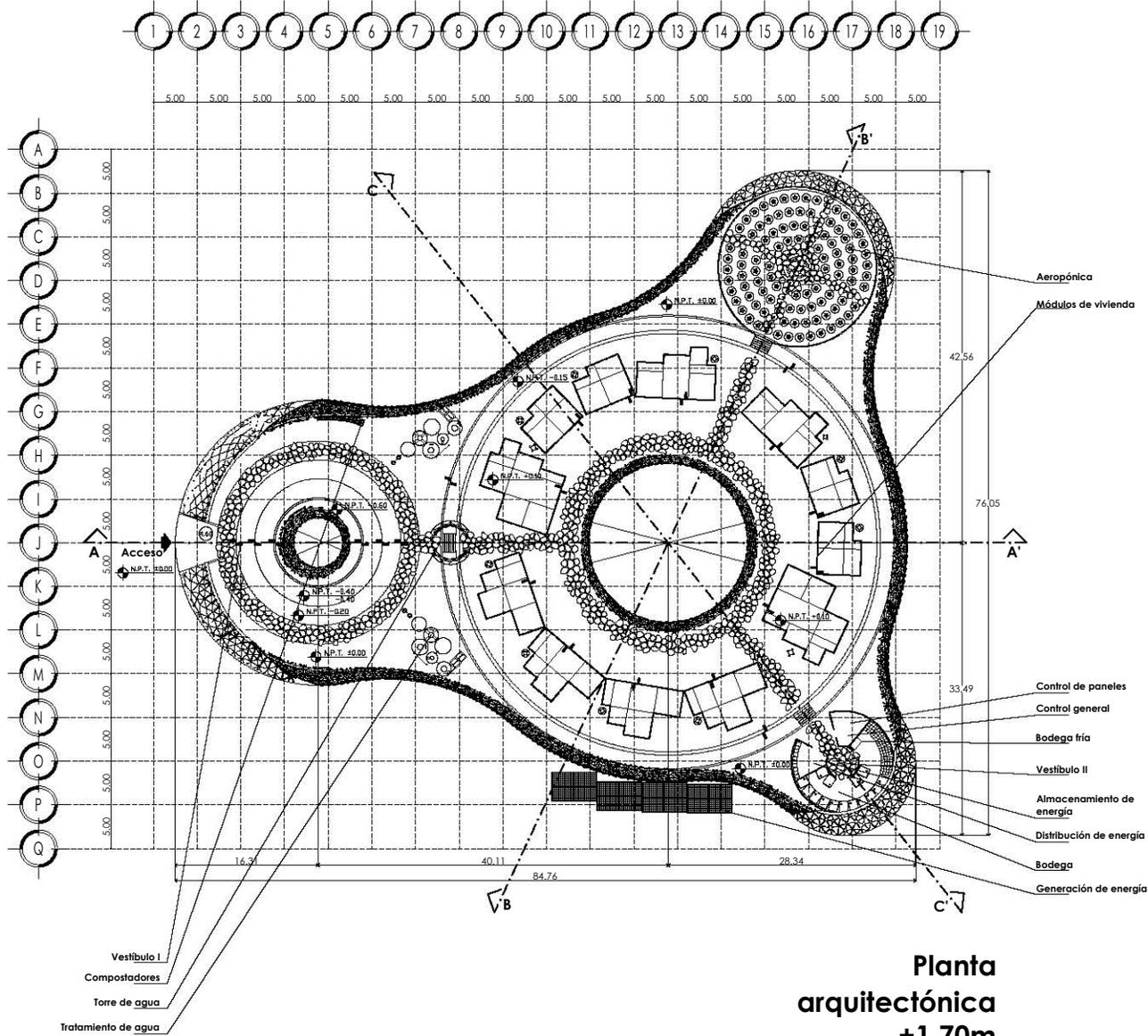
<p>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ARQUITECTURA</p>	
<p>PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA ESPECIALIZACIÓN EN DISEÑO DE CUBIERTAS LIGERAS</p>	
<p>TRABAJO TERMINAL EDCL</p>	
<p>ARG. ESP. MARCOS JAVIER ONTIVEROS HERNÁNDEZ DR. JUAN GERARDO OLIVA SALINAS MITO, MIGUEL ENRIQUE SÁNCHEZ HERNÁNDEZ</p>	
<p>RODOLFO RODRÍGUEZ MUÑOZ</p>	
<p>CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES</p>	
<p>0 0 5 10 20</p>	
<p>CL - 01</p>	



Planta de conjunto

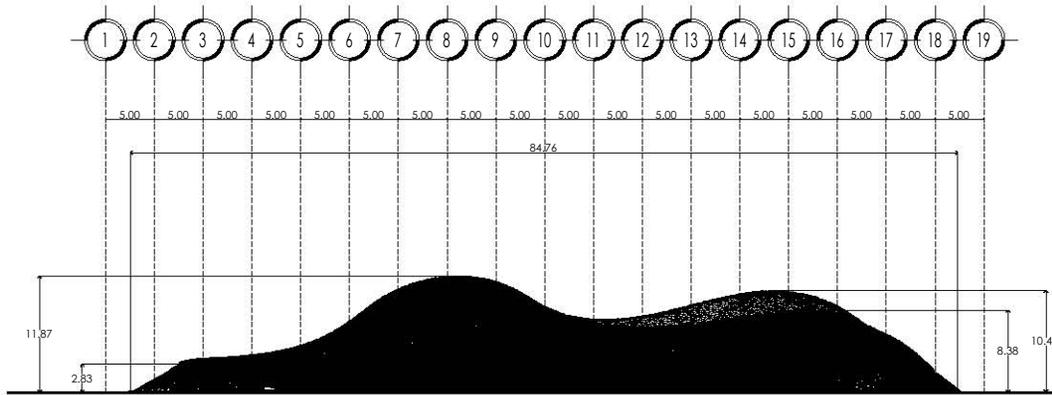
NOMBRE DEL PROYECTO CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES	NOMBRE DEL COLABORADOR RODOLFO RODRIGUEZ MUÑOZ
PARA CONSULTAR 	FORMA DE CONSULTAR
CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO NÚMERO DE PLANOS: 12 ÁREA DE INTERVENCIÓN: 1000 m ² SUPERFICIE COBERTA: 800 m ²	
OBSERVACIONES <ul style="list-style-type: none"> • DIMENSIONES EN METROS • COTAS (NIVELES) EN METROS • ÁNGULOS EN GRADOS • NO SE TOMARÁN COTAS A ESCALA DE ESTE PLANO • ESCALA INDICADA EN EL PIE DE PLANO O DIRECTAMENTE EN EL BLOQUE DE SER REQUERIDO • VERIFICAR DIMENSIONES Y NIVELES CON EL LEVANTAMIENTO GEOMÉTRICO Y PROYECTO ANGIOMÉTRICO • LAS MODIFICACIONES QUE SUPRAN LOS PLANOS SE INDICARÁN EN EL ESPACIO CORRESPONDIENTE DEL PIE DE PLANO • EN LOS SPOTS DONDE NO SE MUESTREN DETALLES COMO TAPAVOS, SE DEBERÁN ADAPTAR A ALGUNO SIMILAR MOSTRADO EN ESTOS PLANOS O MEMORIA. 	
INDICACIONES GRÁFICAS Símbolos para: Corte arquitectónico, Acceso (puertero), Vano (aparejado en metros), Nivel de piso terminado (aparejado en metros), Control de nivel en piso, Vano.	
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ARQUITECTURA PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA ESPECIALIZACIÓN EN DISEÑO DE CUBIERTAS VERDES	
TRABAJO TERMINAL EDCL	
PROFESOR TUTOR DR. ESP. MARCOS JAVIER ONTIVEROS HERNÁNDEZ DR. JUAN GERARDO OLIVA SALINAS MTRO. MIGUEL ENRIQUE SÁNCHEZ HERNÁNDEZ	
ALUMNO RODOLFO RODRIGUEZ MUÑOZ	
TÍTULO DEL PROYECTO CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES	
DIRECCIÓN DEL PROYECTO DIRECCIÓN DEL PLAN TIPO DE PLAN ESCALA: 1:100	
ESCALA: 0 5 10 20	
OBSERVACIONES Plano de planta de conjunto arquitectónica para dar datos de ubicación y medidas generales.	
PLANO DE CONJUNTO	

CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES

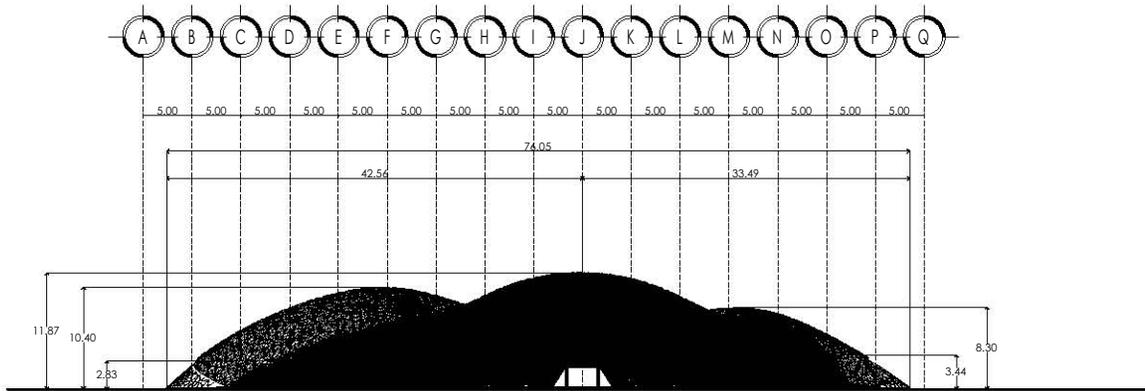


Planta
arquitectónica
+1.70m

CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO NOMBRE DEL PROYECTO: _____ AÑO: QUINCEAVENOS (2015) ESCALA: 1:500 UBICACIÓN: CDMX, CDMX	
NOTAS GENERALES <ul style="list-style-type: none"> • DIMENSIONES EN METROS • COTAS (NIVELES) EN METROS • ANGLESES EN GRADOS • NO SE TOMARÁN COTAS A ESCALA DE ESTE PLANO • ESCALA INDICADA EN EL PIE DE PLANO O DIRECTAMENTE EL DIBUJO DE SER REQUERIDO • VERIFICAR DIMENSIONES Y NIVELES CON EL LEVANTAMIENTO GEOMÉTRICO Y PROYECTO ARQUITECTÓNICO • LAS MODIFICACIONES QUE SUPERA LOS PLANOS SE INDICARÁN EN EL ESPACIO CORRESPONDIENTE DEL PIE DE PLANO • EN LOS SITIOS DONDE NO SE MUESTREN DETALLES CONSTRUCTIVOS, SE DEBERÁN ADAPTAR A ALGUNO SIMILAR MOSTRADO EN LOS PLANOS O MEMORIA. 	
INDICACIONES DE CONSTRUCCIÓN	
ABREVIATURAS 	
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ARQUITECTURA PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA ESPECIALIZACIÓN EN DISEÑO DE CUBIERTAS LIGERAS	
TRABAJO TERMINAL EDCL	
ARQ. ESP. MARCOS JAVIER ONTIVEROS HERNÁNDEZ DR. JUAN GERARDO OLIVA SALINAS MTRO. MIGUEL ENRIQUE SÁNCHEZ HERNÁNDEZ	
RODOLFO RODRÍGUEZ MUÑOZ	
CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES	
DIRECCIÓN: _____ ESCALA: 1:500 TIPO DE OBRA: NUBO NÚMERO DE PLANOS: _____ FECHA DE EMISIÓN: _____ AUTORIZADO: _____ OBSERVACIONES: _____	
0 0 5 10 20	
Plano con planta arquitectónica con un corte a +1.70 para observar espacio y territorialidad por diseño de su cubierta	
Planta Arquitectónica	CL - 03



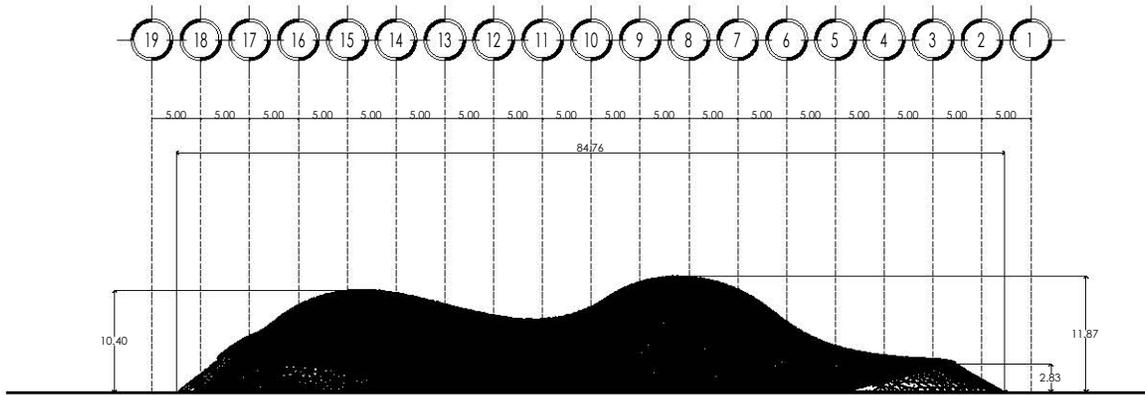
Alzado Sur



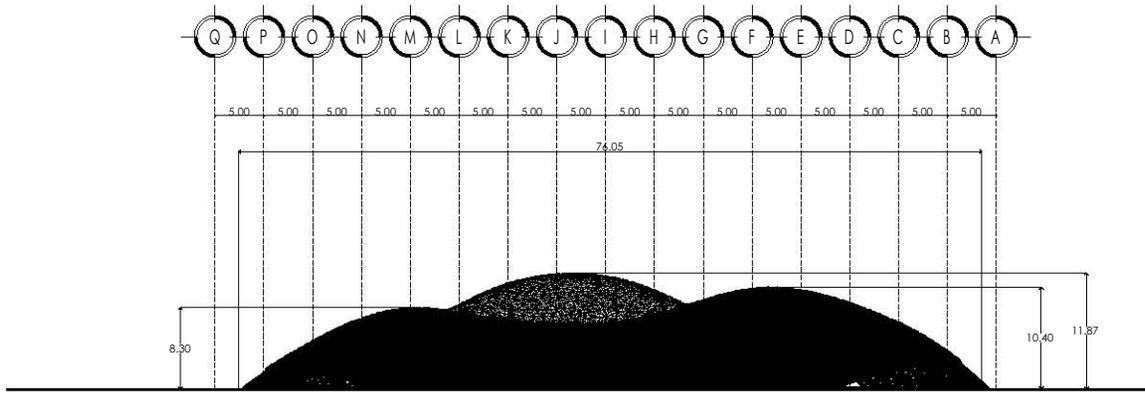
Alzado Poniente

NOMBRE DEL PROYECTO: CARRERA: TÍTULO: SEMESTRE:	NOMBRE DE COORDINADOR: CARRERA: TÍTULO: SEMESTRE:	
NOMBRE DEL PROYECTO: NÚMERO DE PLANOS: ESCALA: FECHA:	NOMBRE DEL PROYECTO: NÚMERO DE PLANOS: ESCALA: FECHA:	
NOTAS GENERALES: • DIMENSIONES EN METROS • COTAS (INVERSES) EN METROS • ANGULOS EN GRADOS • NO SE TOMARÁN COTAS A ESCALA DE ESTE PLANO • ESCALA INDICADA EN EL PIE DE PLANO O DIRECTAMENTE EN EL BUBLE DE SU REQUERIMIENTO • VERIFICAR DIMENSIONES Y INVERSES CON EL LEVANTAMIENTO GEOMÉTRICO Y PROYECTO ARQUITECTÓNICO • LAS MODIFICACIONES QUE SUPRALOS PLANOS SE INDICAN EN EL ESPACIO CORRESPONDIENTE DEL PIE DE PLANO • EN LOS SITIOS DONDE NO SE MUESTREN DETALLES CONSTRUCCIONALES, SE DEBERÁN ADAPTAR A ALGUNO SIMILAR MOSTRADO EN ESTOS PLANOS O MEMORIA.		
MODIFICACIONES/COMENTARIOS:		
SIMBOLOS: Corte arquitectónico Acceso (pedestre) Vano (aparejado en metros) Nivel de piso terminado (aparejado en metros) Cambio de nivel en piso Vacio		
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ARQUITECTURA PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA ESPECIALIZACIÓN EN DISEÑO DE CUBIERTAS URBANAS		
TRABAJO TERMINAL EDCL		
COORDINADOR DEL PROYECTO: DR. JUAN GERARDO OLIVA SALINAS MTR. MIGUEL ENRIQUE SÁNCHEZ HERNÁNDEZ		
AUTOR: RODOLFO RODRÍGUEZ MUÑOZ		
TÍTULO: CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES		
DIRECCIÓN DE: DIRECCIÓN DE: DIRECCIÓN DE: DIRECCIÓN DE:		
ESCALA: 0 0 5 10 20		
PLANOS: Plano arquitectónico de alzado sur y poniente con medidas generales		
ALZADOS I y II		

CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES

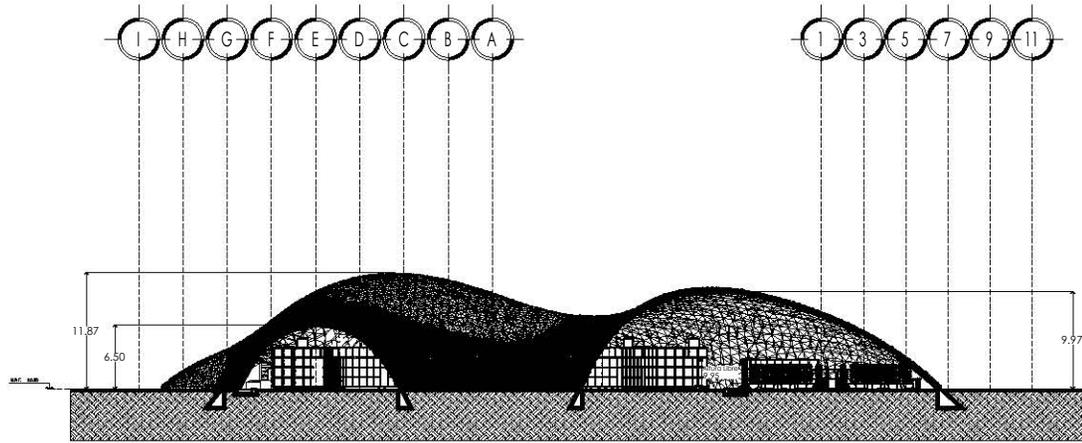


Alzado Norte

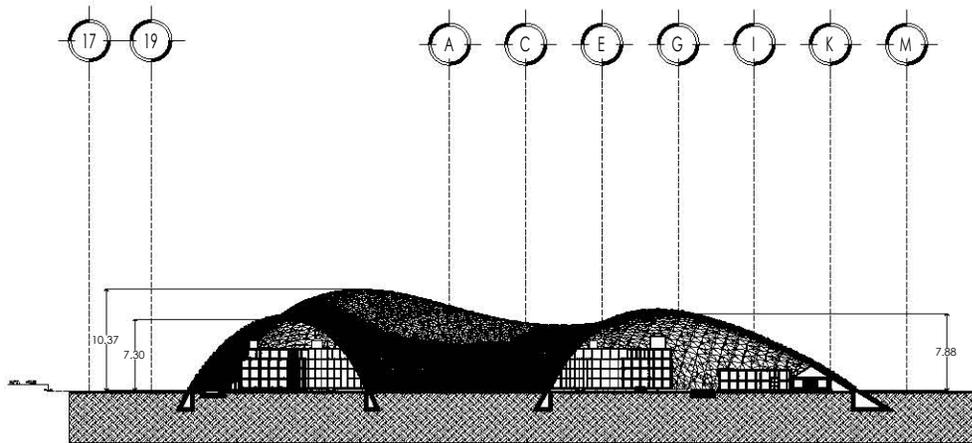


Alzado Oriente

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ARQUITECTURA	PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA ESPECIALIZACIÓN EN DISEÑO DE CUBIERTAS LIGERAS	
TRABAJO TERMINAL EDCL		
AUTOR: DR. ESP. MARCOS JAVIER ONTIVEROS HERNÁNDEZ COORDINADOR: DR. JUAN GERARDO OLIVA SALINAS MTR. MIGUEL ENRIQUE SÁNCHEZ HERNÁNDEZ		
TÍTULO: CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES		
ESCALA: 		
PLANO: 		
TÍTULO DEL PLANO: Alzados III y IV		
CLASE: CL - 05		

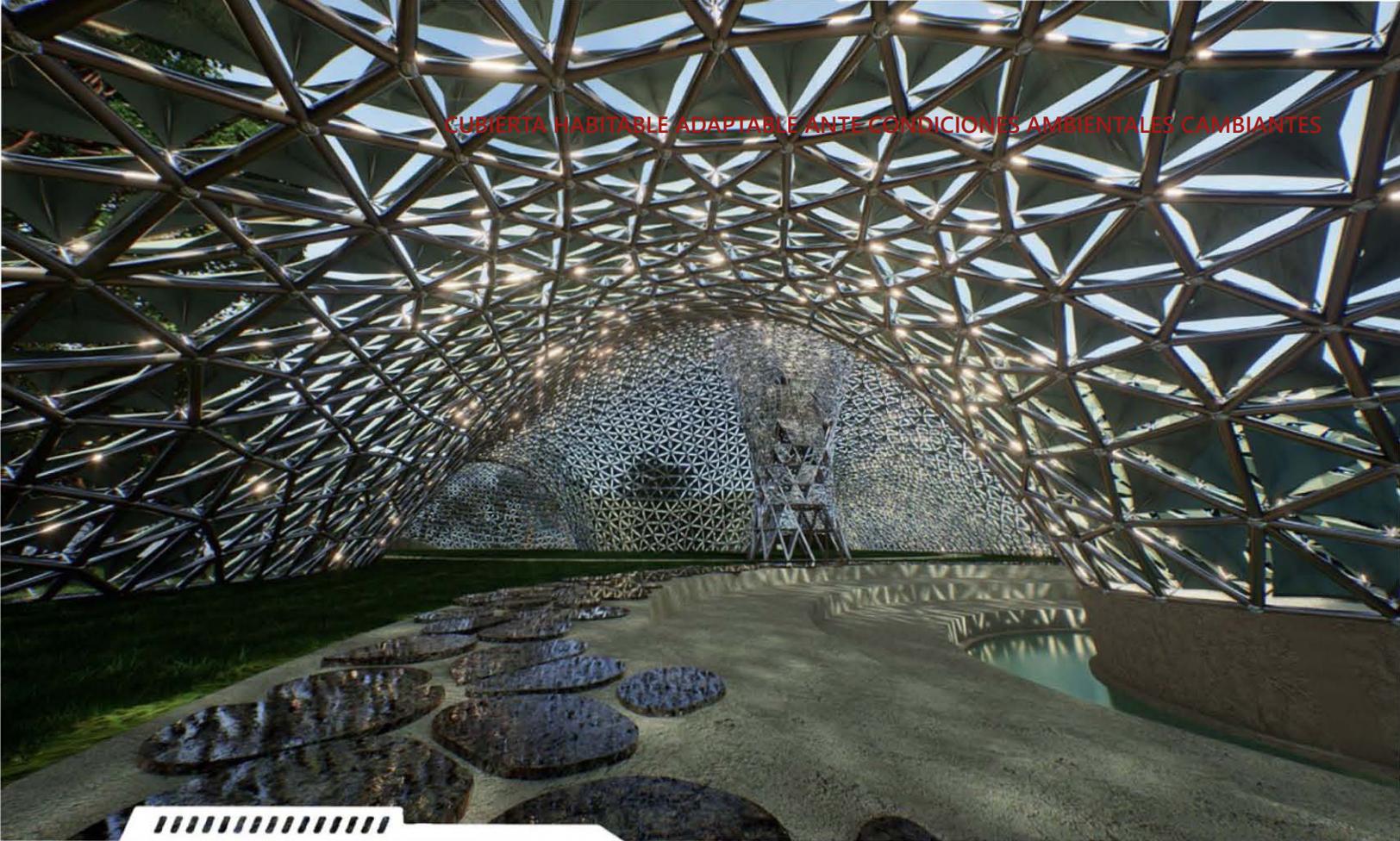


Corte B - B'

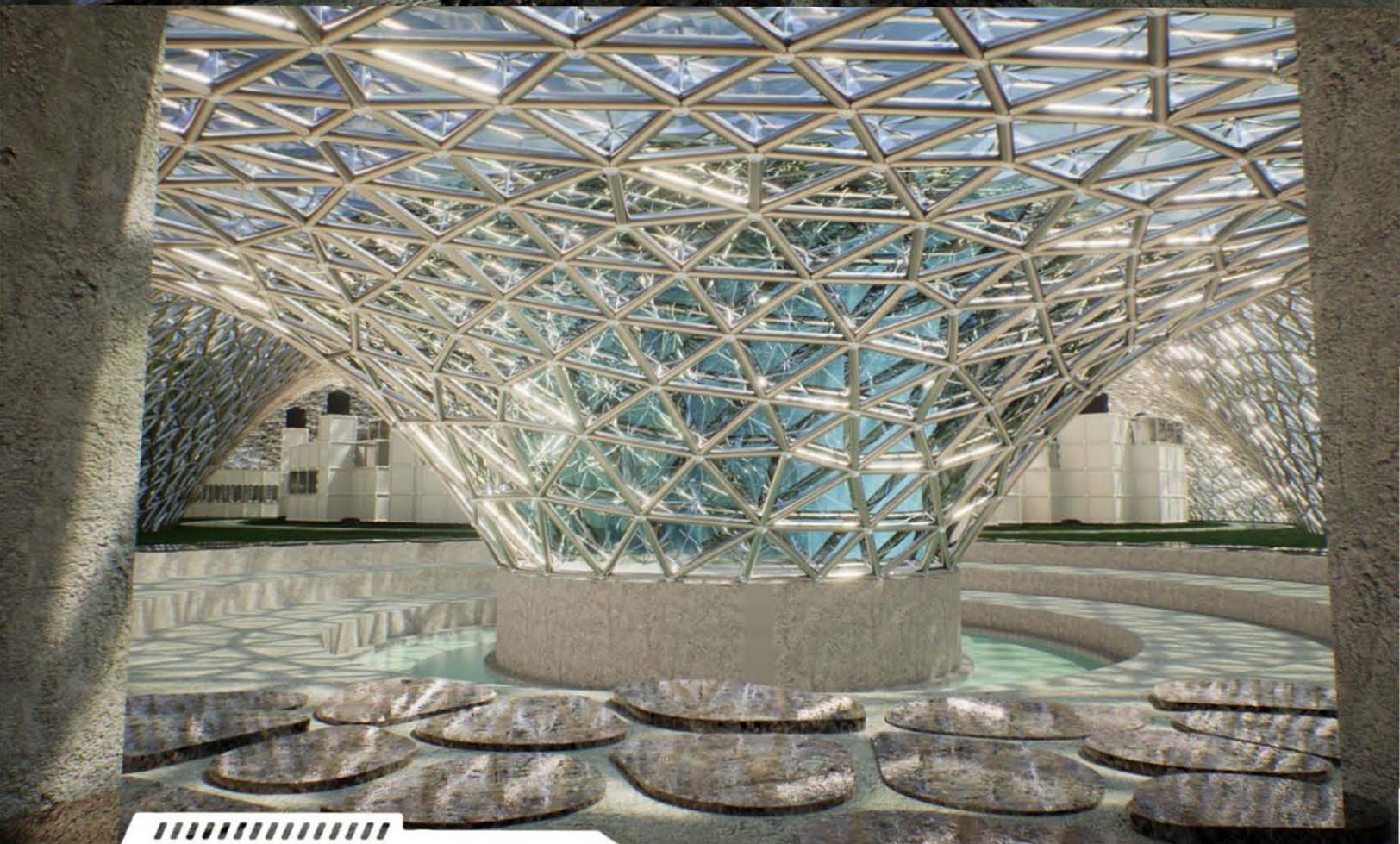


Corte C - C'

<p>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO</p> <p>FACULTAD DE ARQUITECTURA</p> <p>PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA</p> <p>ESPECIALIZACIÓN EN DISEÑO DE CUBIERTAS LIGERAS</p>	<p>TRABAJO TERMINAL EDCL</p> <p>ARQ. ESP. MARCOS JAVIER ONTIVEROS HERNÁNDEZ</p> <p>DR. JUAN GERARDO OLIVA SALINAS</p> <p>MTR. MIGUEL ENRIQUE SÁNCHEZ HERNÁNDEZ</p> <p>RODOLFO RODRÍGUEZ MUÑOZ</p>	
<p>CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES</p>		
<p>0 0 5 10 20</p>		
<p>CL - 07</p>		

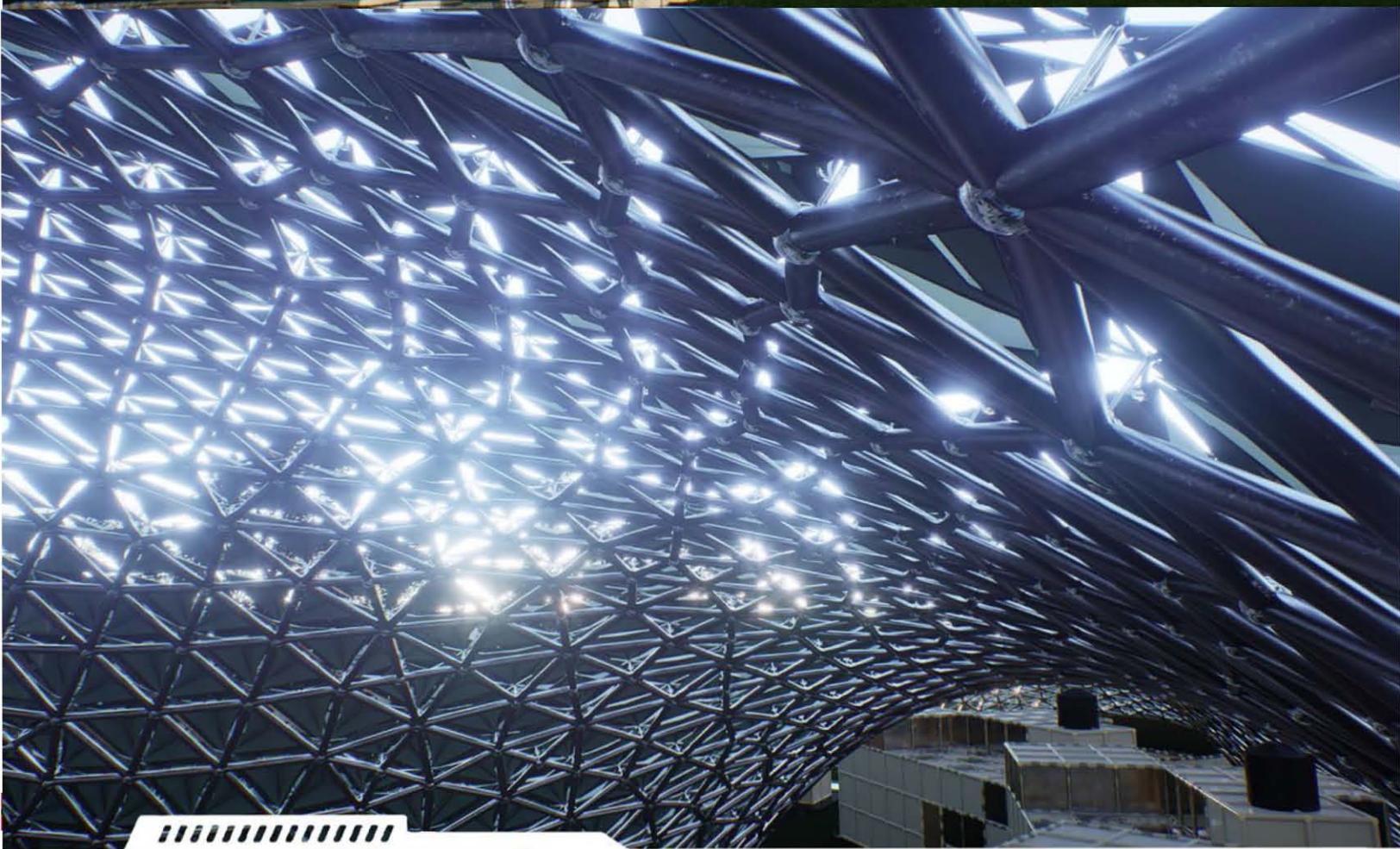


Vista interior sin módulos habitables





Vista interior de torre y módulos habit.

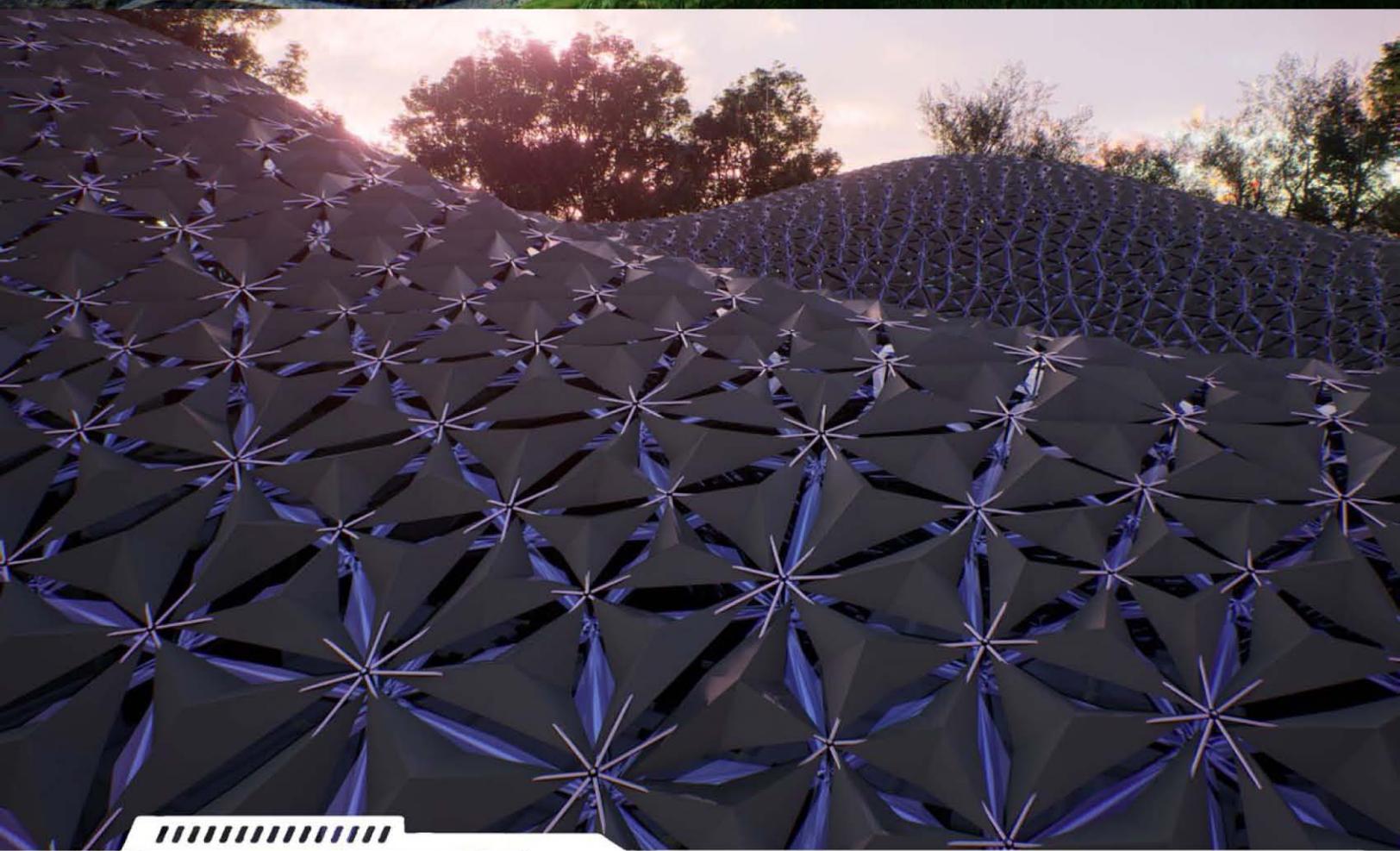


Vista interior bajo la cubierta

CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES



Vista interior hacia plantas de tratam.



Vista exterior de parte del conjunto

4.3 ESTRUCTURA

Dentro de la gran variedad de soluciones estructurales revisadas en el estado del arte con respecto a cubiertas con características de gran claro, hermeticidad, control bioclimático, y adaptabilidad, se determinó el planteamiento de un sistema modular siempre que éste se adaptara y no modificara la geometría de la cubierta. Se analizó que todas estas cubiertas están compuestas por un mínimo de dos capas, las cuales destacan como una primera como esqueleto o estructura portante, una segunda capa de aislamiento generalmente translúcida y una tercera en algunos ejemplos, con un sistema adaptable mecánicamente o por materiales de cambio de fase.

ESTRUCTURA PORTANTE

Al tener que resolver una estructura de grandes dimensiones, en este caso, con área de desarrollo de 4541.25 m² y una flecha en su punto más elevado de 11.87 m, se decantó por una solución de barras y nodos. Dicho sistema estructural debía cumplir con las premisas de diseño de cubrir en su totalidad el espacio, tener apoyos en borde continuo para buscar hermeticidad y control bioclimático, así como soportar su propio peso y el de un sistema adaptable mecánicamente. Se buscó una distancia nodal constante de ser posible (1 m), en la mayoría de sus miembros componentes y poder ser cubierta con placas coplanares, fue así como se determinó su diseño a partir de geometrías triangulares. Con el apoyo de la definición iterativa en *Grasshopper* desarrollada se acercó a un 66.30 % de miembros que cumplieran con la distancia nodal antes mencionada.

Se buscó un diseño estructural con la capacidad y posibilidad de ser montable y desmontable, ya sea por adaptarla a distintos sitios o geometrías e incluso por ser el final de su vida útil. Es por ello por lo que el nodo debía contar con propiedades flexibles para poder recibir de 5 a 7 barras según los requerimientos y provenir de una geometría que le permitiera adaptar sus piezas

a distintas posiciones en el espacio y cumplir con los requerimientos formales de la estructura. Se debió acompañar de una selección de materiales y calibres, en este caso, de acero, al ser un material lo suficientemente comercial, maleable, adaptable a otras geometrías y al final de su vida reciclable hasta cierta medida. Dichos materiales y sus secciones pudieron ser visualizados en tiempo real dentro de la definición iterativa desarrollada tanto geométrica con *Kangaroo Physics* como estructuralmente en *Karamba 3D*, por lo que fue posible revisar su viabilidad digitalmente antes de continuar con la propuesta. Ningún modelo digital es capaz por sí mismo de determinar la estabilidad de sistema estructural, sin embargo, la propuesta del resto de sus piezas componentes, su correcto diseño y propiedades materiales físicas y mecánicas pueden acercar a otorgar una solución congruente. Y fue por esta razón que se diseñaron las piezas componentes hasta sus últimas consecuencias.

CIMENTACIÓN

Una vez conociendo la geometría de la estructura portante en su totalidad se determinó que la condición de borde en adición con las premisas de diseño arquitectónico debía apoyarse en una cimentación continua a lo largo del perímetro de la cubierta, así como de los óculos como apoyos centrales. No obstante, debía acompañar la geometría para no poner en detrimento la estabilidad estructural, es decir, extenderse al suelo hasta lograr otorgar la solidez y continuidad requerida.

Dicha cimentación se diseñó como una zapata continua de concreto armado, en donde su paño exterior debía seguir la inclinación de la forma obtenida con apoyo de *RhinoVAULT 2* e intersecada por un plano horizontal a una altura de 1.95 m por debajo del nivel +/- 0.00 m. La base de dicho volumen consideró un rango de anchura de 1.25 m hasta 2.75 m según los esfuerzos observados y calculados en *Karamba 3D*, dichos esfuerzos pueden ser revisados en dicho capítulo.

Así mismo, en el paño interior de la zapata, se erige un volumen continuo vertical de 1.82 m para evitar el volteo y que permite finalmente, que, para coronar la geometría se cuente con un área de desplante de donde nace la estructura portante de 0.20 m. Dicho diseño de cimentación se replicó para los óculos como apoyos centrales en donde el de menor escala cuenta con una base de 1.25 m mientras que el de mayor escala de 1.30 m.

Sobre la zapata continua en los extremos que comprenden las zonas de acceso, cultivo y almacenamiento y energía, se diseñaron muros de concreto armado de 0.20 m de espesor siguiendo la geometría de la estructura portante con un estampado que continúa visualmente las barras y nodos acomodados como módulos triangulares. Dicho muro en la zona de acceso contiene la intersección de un prisma rectangular con base trapezoidal con el fin de generar la entrada con un ancho de 6.75 m en el paño exterior y 3.25 m en el paño interior.

La conexión entre la estructura portante y la cimentación se da forma continua sin tener la necesidad de ajustar la distancia original de las barras como resultado de la re-geometrización de *MeshMachine* y de la geometría obtenida con *RhinoVAULT 2*. Esto quiere decir que el paño superior de la zapata corrida de 0.20 m soporta nodos que se encuentran seccionados de manera que reciba solamente barras completas. Una preparación previa en el armado con varillas de $\frac{3}{8}$ " y placas de conexión en el área de desplante diagonal que corona la cimentación se encargan de recibir por medio de soldadura los nodos seccionados previamente. La tolerancia cercana a un valor de 0 % es crucial en este paso ya que un ligero movimiento fuera de los ejes proyectados provocará un desajuste, desvío de las piezas superiores e imposibilidad de conectar barras con nodos posteriormente.

DISTRIBUCIÓN DE AGUA

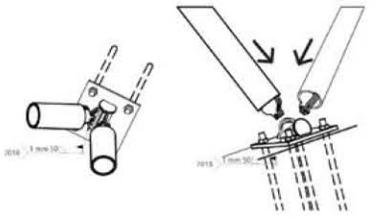
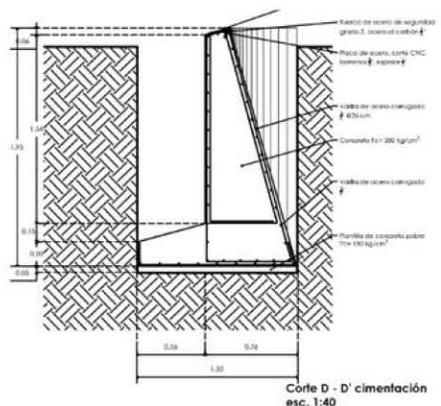
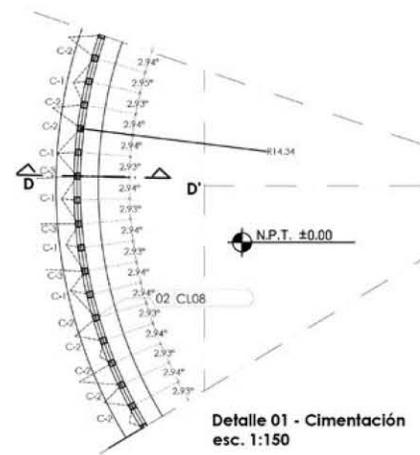
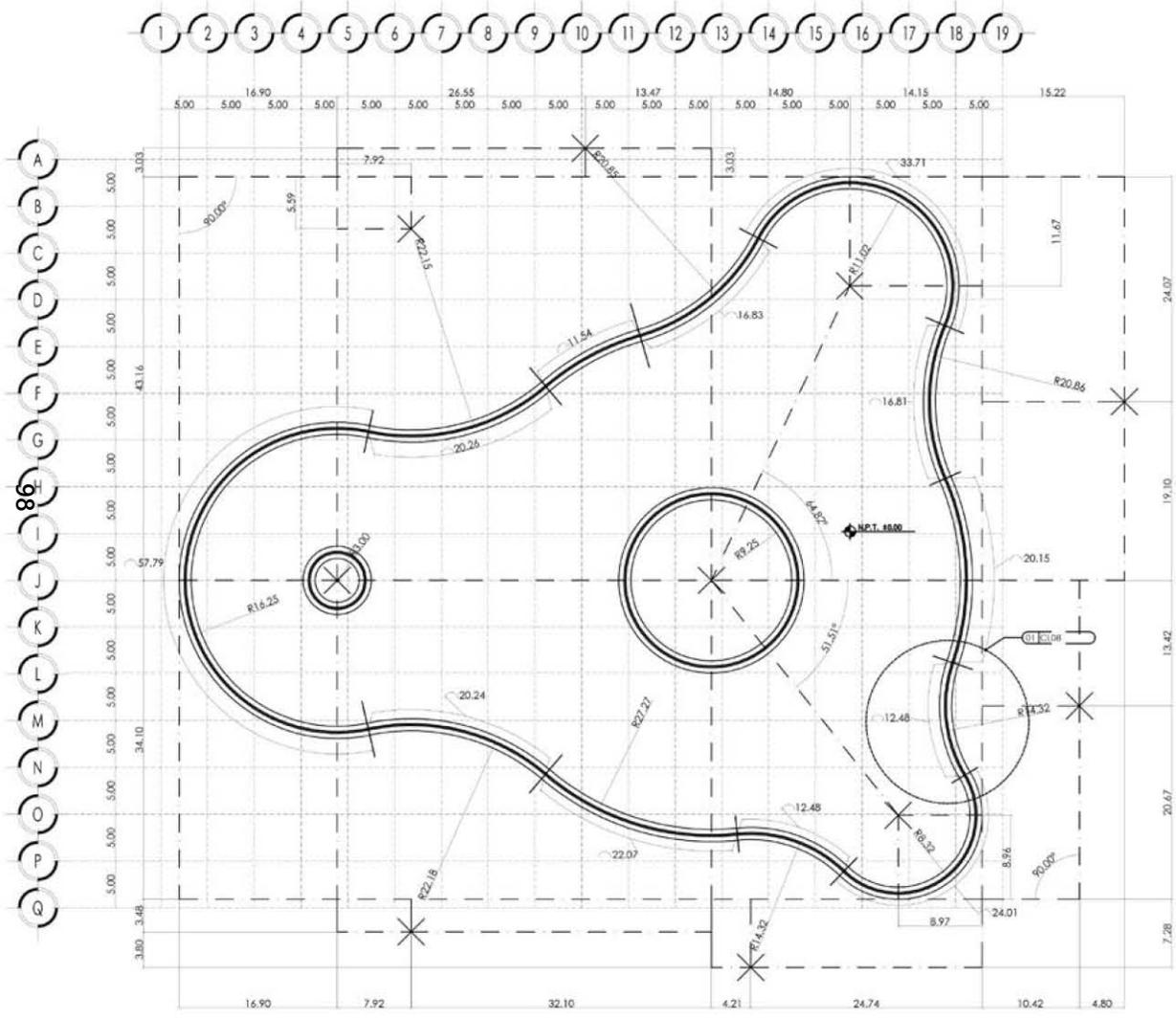
Con el fin de distribuir el agua hacia la zona de módulos de viviendas y cultivo, se diseñó un canal continuo al aire libre con un diámetro de 26.07 m al exterior y 23.92 m al interior, el cual fue planteado como prefabricado y sellado en sus juntas por medio de un colado ligero. Dentro del mismo anillo oculto a la vista se proyectó que el regreso se llevaría paralelo al agua potable, es decir, las aguas residuales toman el mismo camino separados por un volumen hasta las plantas de tratamiento aprovechando el recorrido.

TORRE DE AGUA

El inicio de la distribución de agua tratada ya sea pluvial o residual se da a partir de una torre de agua al centro del conjunto la cual se encuentra por encima del nivel general de los servicios. Ésta se diseñó a partir de un hiperboloide de revolución como superficie reglada con postes contenidos por anillos distribuidos en toda su altura y recubierta por placas de acero multi perforadas con patrones de venas donde el tanque de agua se encuentra contenido dentro de ésta. La cimentación de la torre está resulta por medio de un cajón de cimentación somero cilíndrico y cabe destacar que tanto su cimentación como la parte superior de esta, no está conectado de ninguna manera ni a la zapata corrida de la cubierta ni a la estructura portante de barras y nodos con el fin de no interferir geométrica ni estructuralmente.

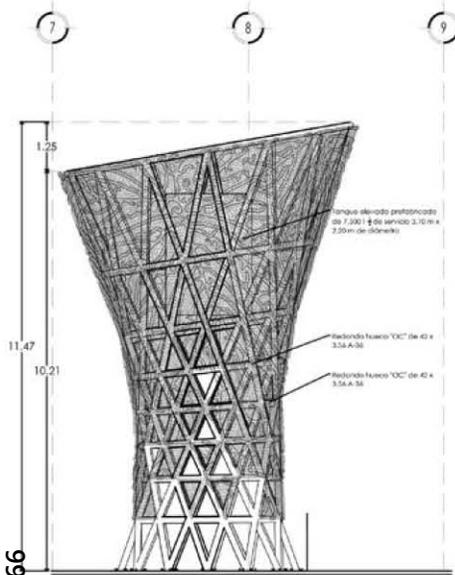
CONEXIÓN CON MÓDULO MECÁNICO ADAPTABLE

Tanto la definición desarrollada como la materialidad de la parte superior del nodo contempla un punto de partida normal a la superficie de un tubo circular de acero OC de 1/2" (21 mm x 2.77 mm) a partir del centroide superior del nodo con longitud de 0.27 m hasta la pieza cilíndrica que inicia el desplazamiento de los 6 paneles.

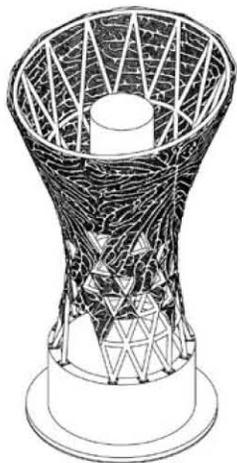


Planta de trazo y
cimentación

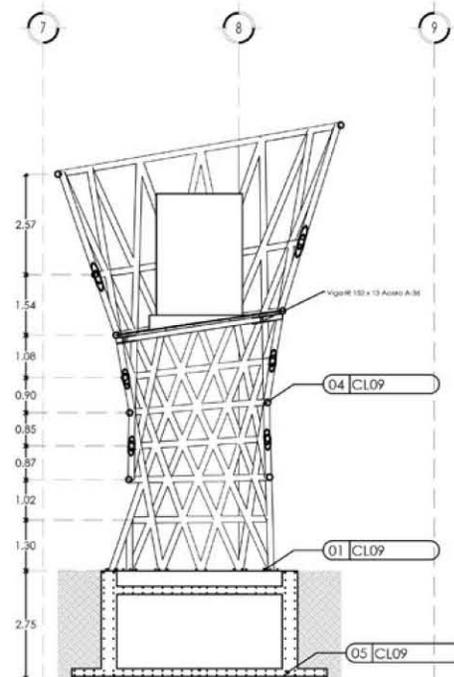
<p>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ARQUITECTURA PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA ESPECIALIZACIÓN EN DISEÑO DE CUBIERTAS Y EGRESAS</p> <p>TRABAJO TERMINAL EDCL</p> <p>ARG. ESP. MARCOS JAVIER ONTIVEROS HERNÁNDEZ DE. JUAN GERARDO OLIVA SALINAS MBO. MIGUEL ENRIQUE SÁNCHEZ HERNÁNDEZ</p> <p>RODOLFO RODRÍGUEZ MUÑOZ</p> <p>CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES</p>	
<p>Cimentación</p>	



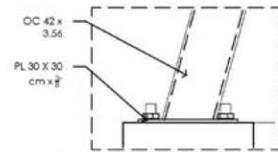
Alzado frontal torre de agua
esc. 1:125



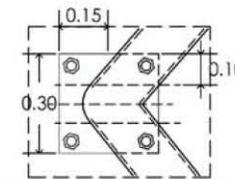
Isométrico torre de agua
esc. 1:150



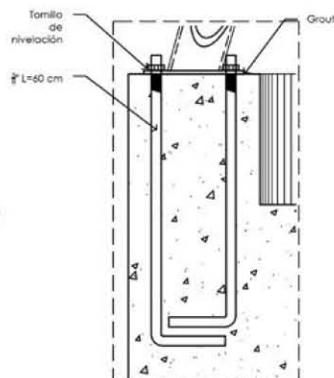
Corte E-E' torre de agua
esc. 1:125



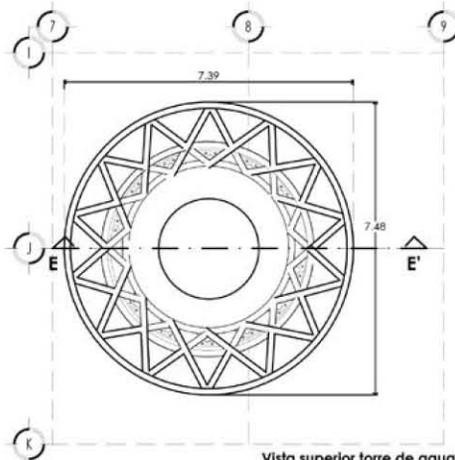
Detalle 01: Alzado placa de desplate de estructura
esc. 1:10



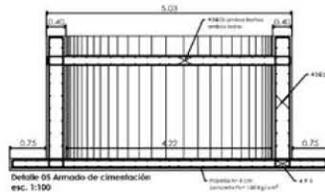
Detalle 02: Planta placa de desplate de estructura
esc. 1:10



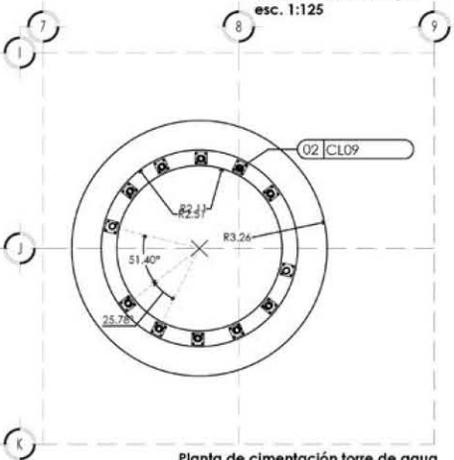
Detalle 03: Alzado anclaje a cimentación
esc. 1:10



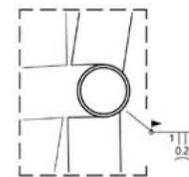
Vista superior torre de agua
esc. 1:125



Detalle 05: Armado de cimentación
esc. 1:100

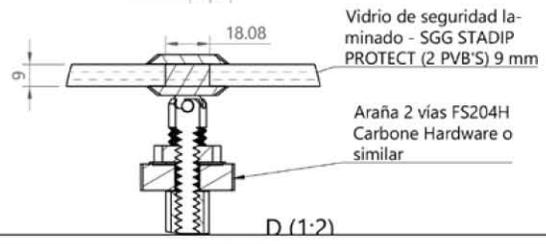
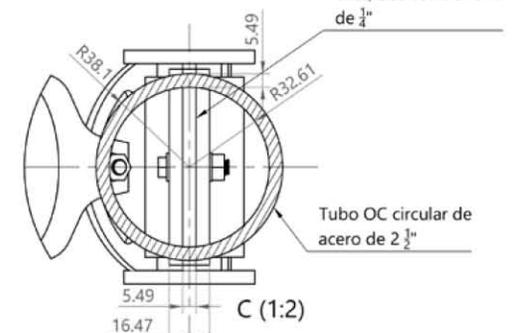
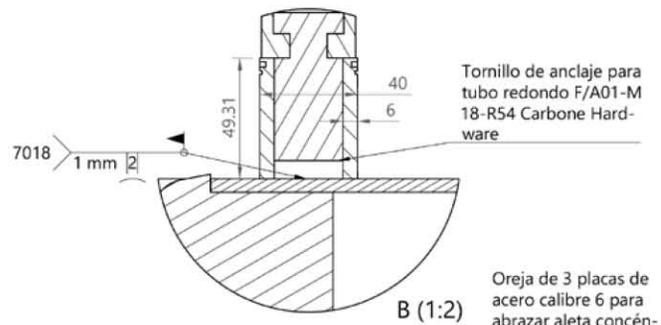
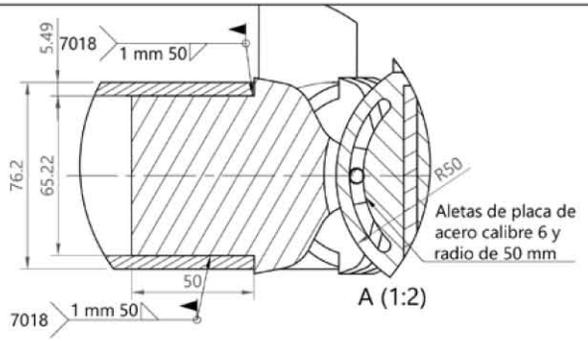
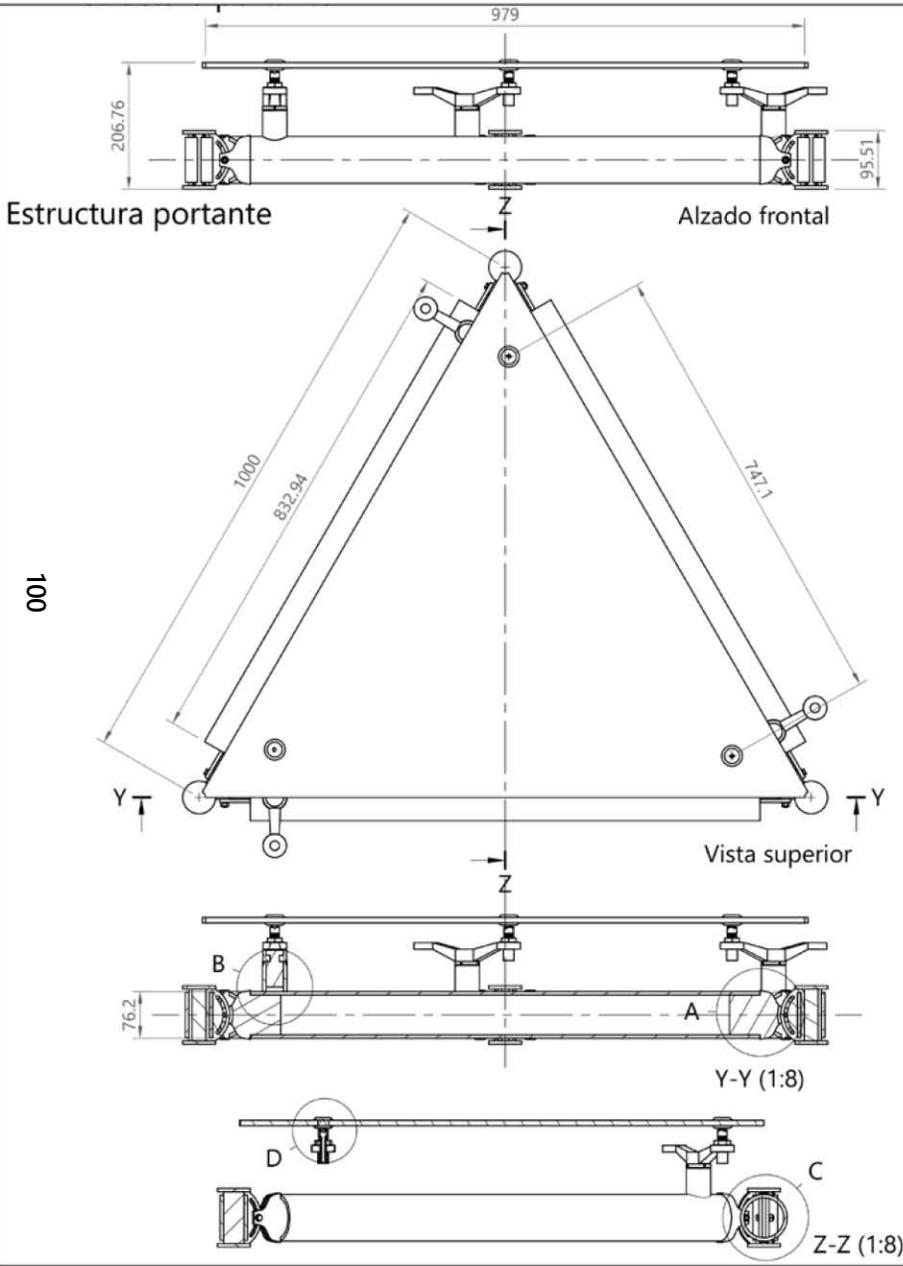


Planta de cimentación torre de agua
esc. 1:125



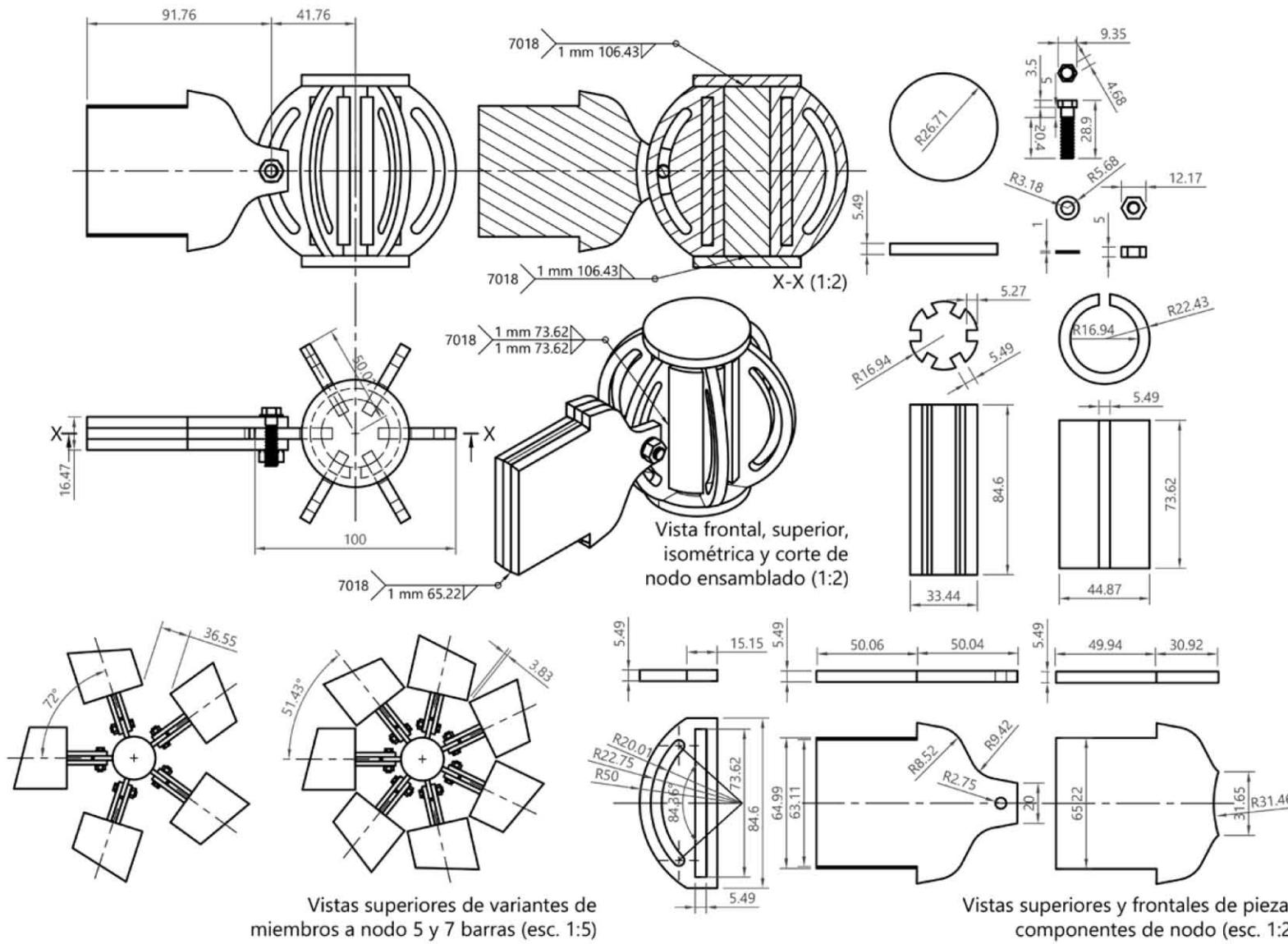
Detalle 04: Unión de elemento de anillo y columnas
esc. 1:10

<p>CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES</p>	
<p>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ARQUITECTURA PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA ESPECIALIZACIÓN EN DISEÑO DE CUBIERTAS VERDES TRABAJO TERMINAL EDCI</p>	
<p>ARG. ESP. MARCOS JAVIER ONTIVEROS HERNÁNDEZ DE. JUAN GERARDO OLIVA SALINAS MTR. MIGUEL ENRIQUE SÁNCHEZ HERNÁNDEZ RODOLFO RODRÍGUEZ MUÑOZ</p>	
<p>CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES</p>	
<p>Torre de agua - elevada</p>	



100

<p>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ARQUITECTURA PROGRAMA (ÍNICO DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA) ESPECIALIZACIÓN EN DISEÑO DE CUBIERTAS LIGERAS</p>	
<p>TRABAJO TERMINAL EDIC</p>	
<p>ARQ. ESP. MARCOS JAVIER OMTIVERO HERNÁNDEZ DE. JUAN GERARDO OLIVA SALINAS MTRO. MIGUEL ENRIQUE SÁNCHEZ HERNÁNDEZ</p>	
<p>RODOLFO RODRÍGUEZ MUÑOZ</p>	
<p>CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES</p>	
<p>CL - 10</p>	

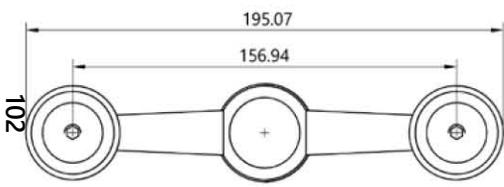
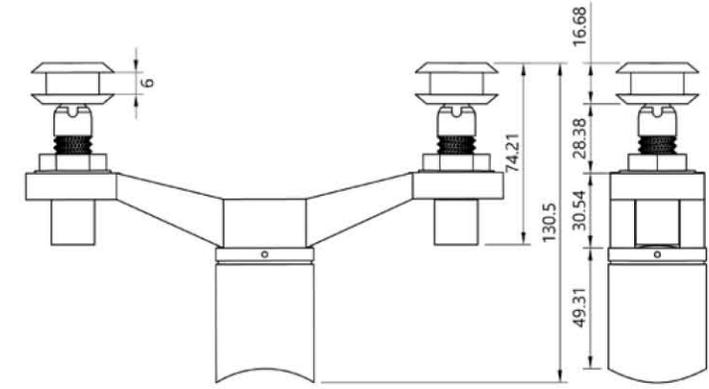


Vista frontal, superior, isométrica y corte de nodo ensamblado (1:2)

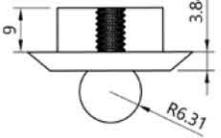
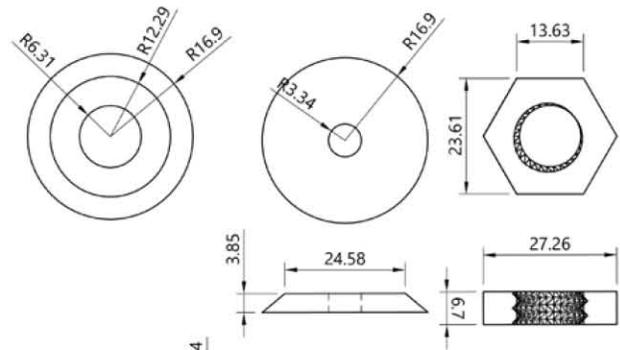
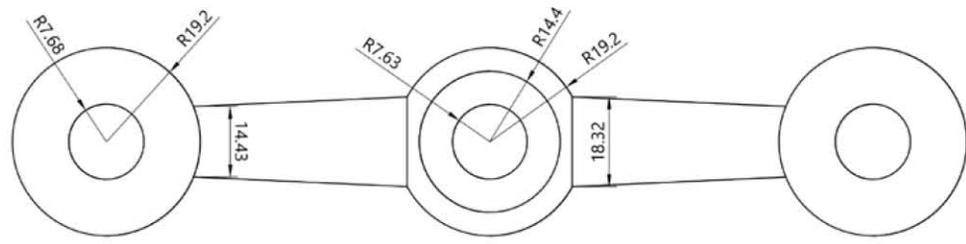
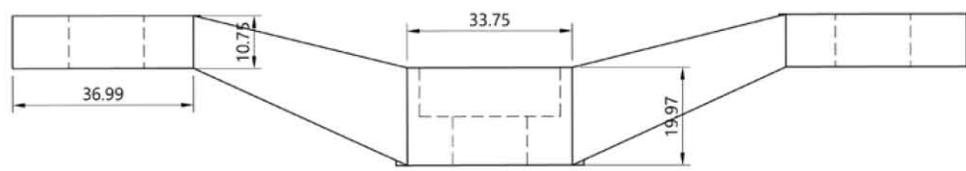
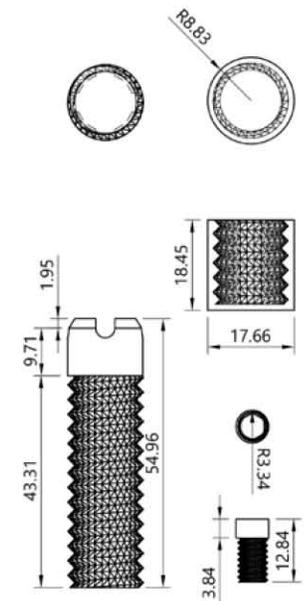
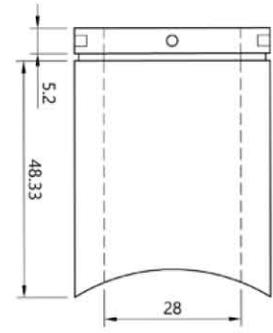
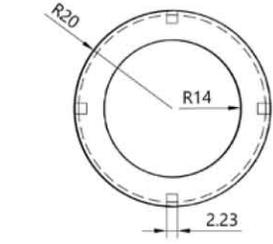
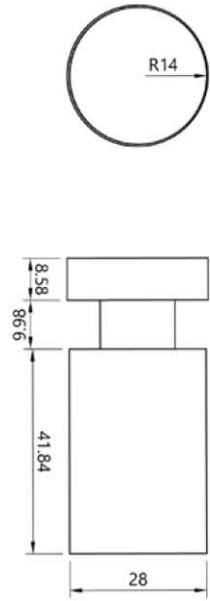
Vistas superiores de variantes de miembros a nodo 5 y 7 barras (esc. 1:5)

Vistas superiores y frontales de piezas componentes de nodo (esc. 1:2)

<p>CUBIERTA HABITABLE ADAPTADA ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES</p>	
<ul style="list-style-type: none"> • DIMENSIONES EN MILÍMETROS • COTAS DIFERES EN MILÍMETROS • ANGELOS EN GRADOS • NO SE TOMARAN COTAS A ESCALA EN ESTE PLANO • ESCALA INDICADA EN EL PIE DE PLANO O DIRECTAMENTE DEBIDO A SU NATURALEZA • HORIZONTALES DIMENSIONES Y ANGULOS CON EL LEVANTAMIENTO GEOMÉTRICO Y PROYECTO ARQUITECTÓNICO • LAS UNIFICACIONES QUE SUPLEN LOS PLANOS SE REALIZAN EN EL ESPACIO CORRESPONDIENTE EN EL PIE DE PLANO • EN LOS SPOTS DONDE NO SE MUESTREN DETALLES CON UN TÍTULO, SE TOMARÁN ACORDAR A ACCORDO SUELA/ MUEBLES/ SUELOS/ MUEBLES/ O MEMORIA. 	
<p>Material: Solderado 7018 para acero al carbono para a la norma ISO 9018, 2 mm de espesor, 2 mm de longitud de cobertura.</p> <p>Solderado 7018 para acero al carbono para a la norma ISO 9018, 2 mm de espesor, 2 mm de longitud de cobertura.</p> <p>Es corte material 2018, 2 mm de espesor, 2 mm de longitud de cobertura.</p>	
<p>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ARQUITECTURA PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA ESPECIALIZACIÓN EN DISEÑO DE CUBIERTAS VERDES</p>	
<p>TRABAJO TERMINAL EDCL</p>	
<p>ARG. ESP. MARCOS JAVIER ONTIVEROS HERNÁNDEZ DE. JUAN GERARDO OLIVA SALINAS MTO. MIGUEL ENRIQUE SÁNCHEZ HERNÁNDEZ RODOLFO RODRÍGUEZ MUÑOZ</p>	
<p>CUBIERTA HABITABLE ADAPTADA ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES</p>	
<p>1:11</p>	



Vista frontal, superior y lateral de araña de sujeción tipo de barra a vidrio (esc. 1:2)



Vistas frontales y superiores de piezas componentes de araña de sujeción de barra a vidrio (esc. 1:1)



UNAM	UNAM	UNAM

UNAM	UNAM	UNAM

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ARQUITECTURA
PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA
ESPECIALIZACIÓN EN DISEÑO DE CUBIERTAS LIGERAS

TRABAJO TERMINAL EDCL

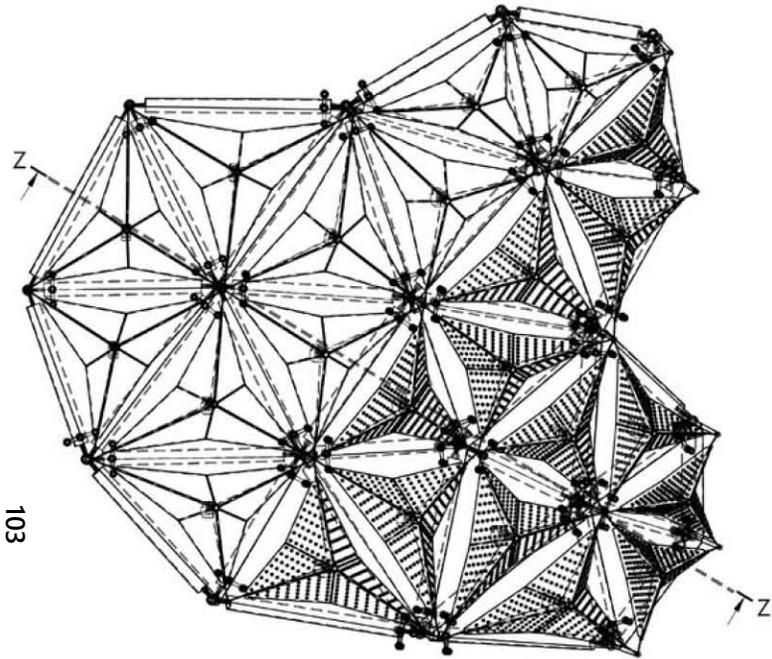
ARQ. ESP. MARCOS JAVIER UNIVERREROS HERNÁNDEZ
DE: JUAN GERARDO OLIVA SALINAS
MTRO. ARGUEL ENRIQUE SÁNCHEZ HERNÁNDEZ

RODOLFO RODRÍGUEZ MUÑOZ

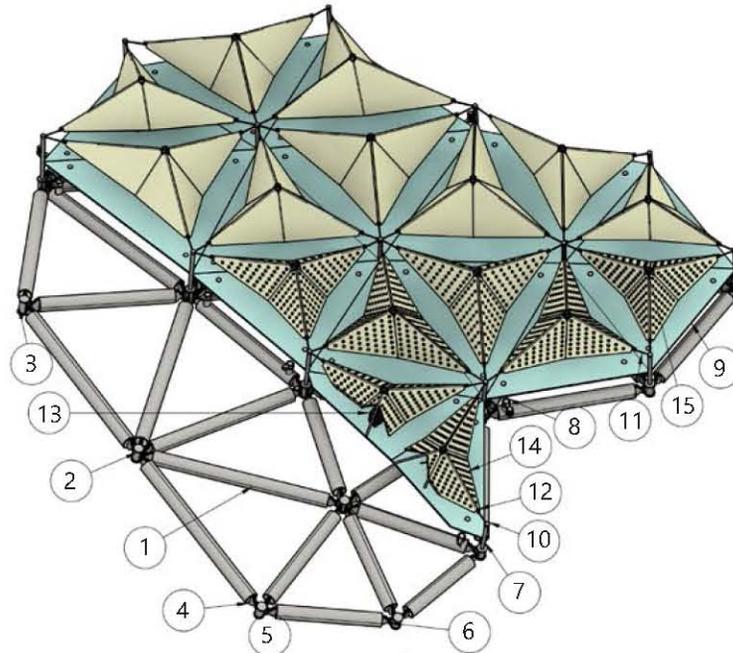
CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES

UNAM	UNAM	UNAM

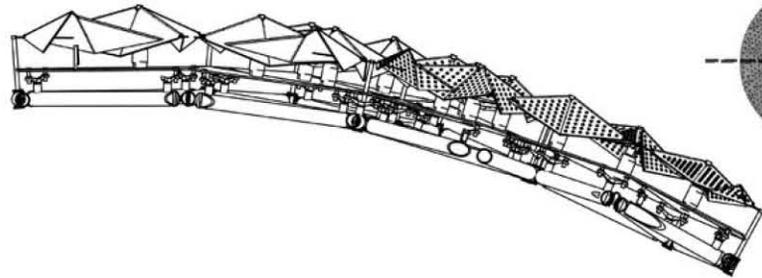
UNAM	UNAM	UNAM



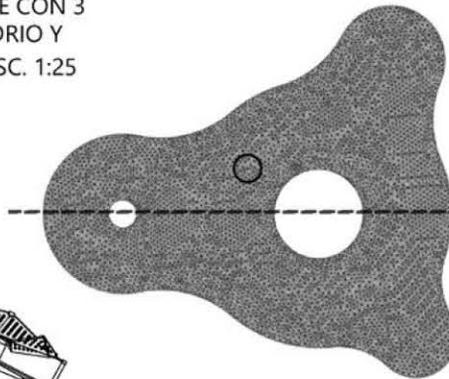
VISTA SUPERIOR ENTRE-EJE CON 3 NIVELES (E. PORTANTE, VIDRIO Y MÓDULOS MECÁNICOS) ESC. 1:25



CORTE ISOMÉTRICO - TRANSVERSAL ESC. 1:25



Z-Z (1:25)



PLANTA ESQUEMÁTICA DE UBICACIÓN DE ENTRE-EJE ESC. 1:1000

Tabla: Identificador de componentes en Entre-Eje	
#	Nombre de componente
1	Tubo OC circular de acero de 2 1/2"
2	Tope superior e inferior de nodo de placa de acero calibre 6
3	Tubo de acero circular OC de 1 1/2"
4	Oreja de 3 placas de acero calibre 6
5	Aleta de placa de acero calibre 6
6	Fijación oreja - aleta via tornillo A325, tuerca y rondanas
7	Tubo de acero circular OC de 1/2"
8	Araña de 1/2 vías FS204XX Carbone Hardware
9	Vidrio de seguridad laminado 9 mm - 2 PV8'S
10	Tapa cilíndrica de acero inoxidable 1,2 cm d y 1,5 cm h
11	Varilla lisa redonda sólida 304 de acero inoxidable de 3/16"
12	Articulaciones deslizables 3D PACF Nylon con fibra de carbono
13	Actuador lineal LA23 LINAK
14	Paneles móviles de ABS de 1/2" sólidos y multiperforados
15	Sensores ambientales para medición de luz, humedad, tempr. Etc.

CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ARQUITECTURA
PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA
ESPECIALIZACIÓN EN DISEÑO DE CUBIERTAS Y PASAJES

TRABAJO TERMINAL ECOL

ARQ. ESP. MARCOS JAVIER ONTIVEROS HERNÁNDEZ
DE. JUAN GERARDO OLIVA SALINAS
MBO. MIGUEL ENRIQUE SÁNCHEZ HERNÁNDEZ

RODOLFO RODRÍGUEZ MUÑOZ

CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES

Entre - eje estructura

4.4 MÓDULOS MECÁNICOS ADAPTABLES

Se tuvieron siempre en cuenta las premisas de diseño arquitectónicas y estructurales que influían directamente en la concepción de los módulos mecánicos adaptables. Se debían ceñir al sistema estructural de gran claro evitando aportar un exceso de peso sobre éste. Aprovechar el nodo diseñado existente como una estructura portante conservando la geometría y su coplanaridad al haberla subdividido en placas triangulares, tomándolas, así como generatrices. Dentro del apartado arquitectónico, adaptarse y guardar la propiedad de flexibilidad al interior para cumplir a cabalidad con la calidad espacial en cada zona y espacios componentes.

Después de revisar y analizar edificaciones análogas en cuanto a forma y funcionalidad adicionado a las premisas anteriormente atendidas, se plantearon dos grandes grupos de soluciones adaptables: Vía mecánica, es decir, por medio de mecanismos, sensores y energía se podría solucionar la adecuación al interior. Vía materiales inteligentes o de cambio de fase, por medio de materiales que por su composición al entrar en contacto con algún estímulo modifican su tamaño, geometría, etc. En este proyecto se decidió tomar la vía mecánica ya que permitió un control, lectura y síntesis de las variables exteriores completo, creando dominios para acotar el accionar del sistema. Caso contrario a una vía de materiales inteligentes en donde las variables aumentan y con ello su complejidad.

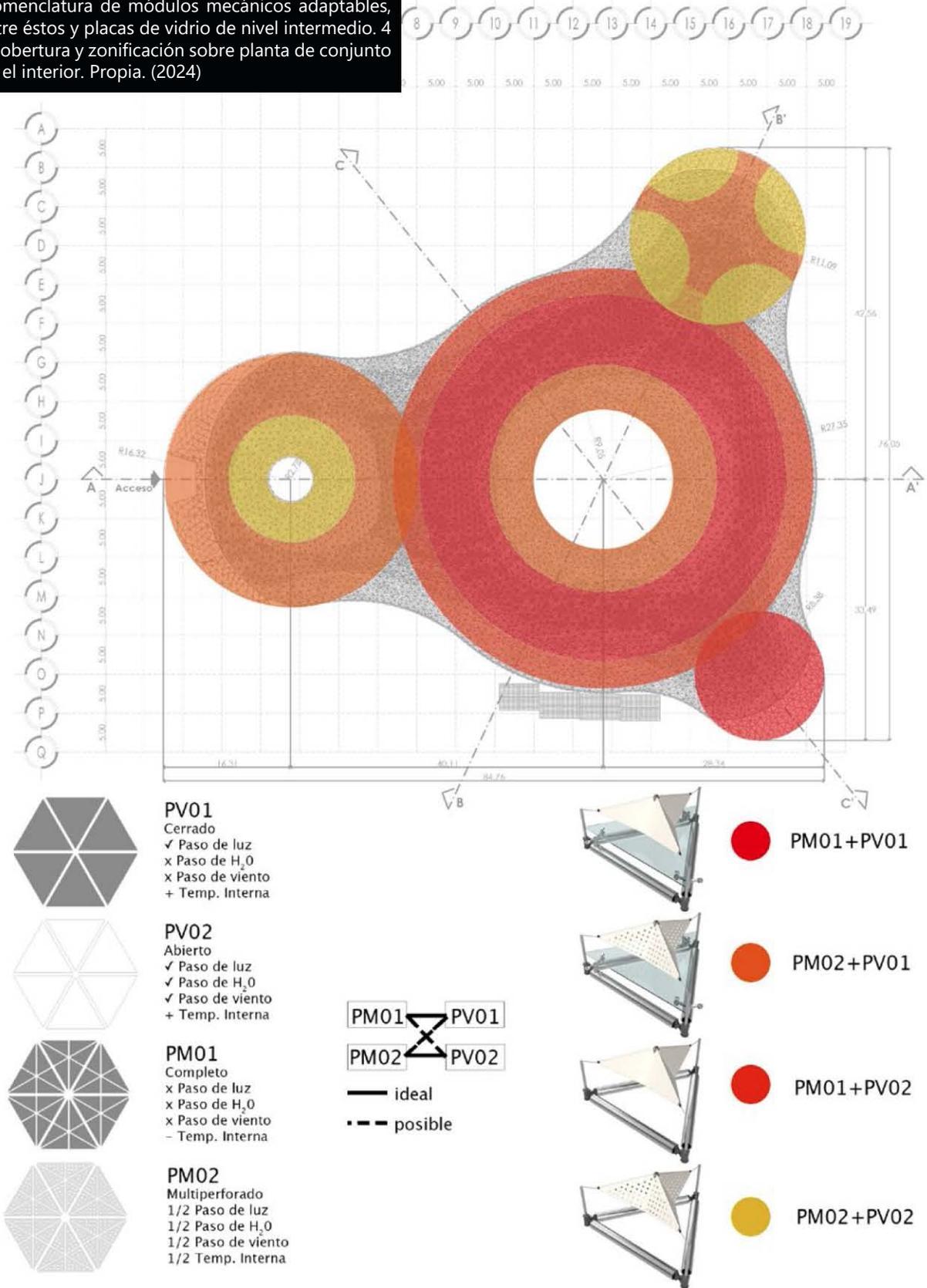
Se concibió este tercer nivel de la cubierta habitable como una "piel" adaptable como este extenso órgano capaz de respirar y permitir el intercambio de energía por medio de abrirse y cerrarse. Así como de recibir estímulos entre el exterior y el interior del conjunto vía sensores integrados y como el sistema nervioso, actuar en consecuencia para mantener las mejores condiciones según la zona para los usuarios.

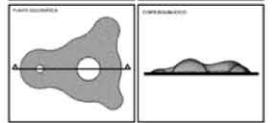
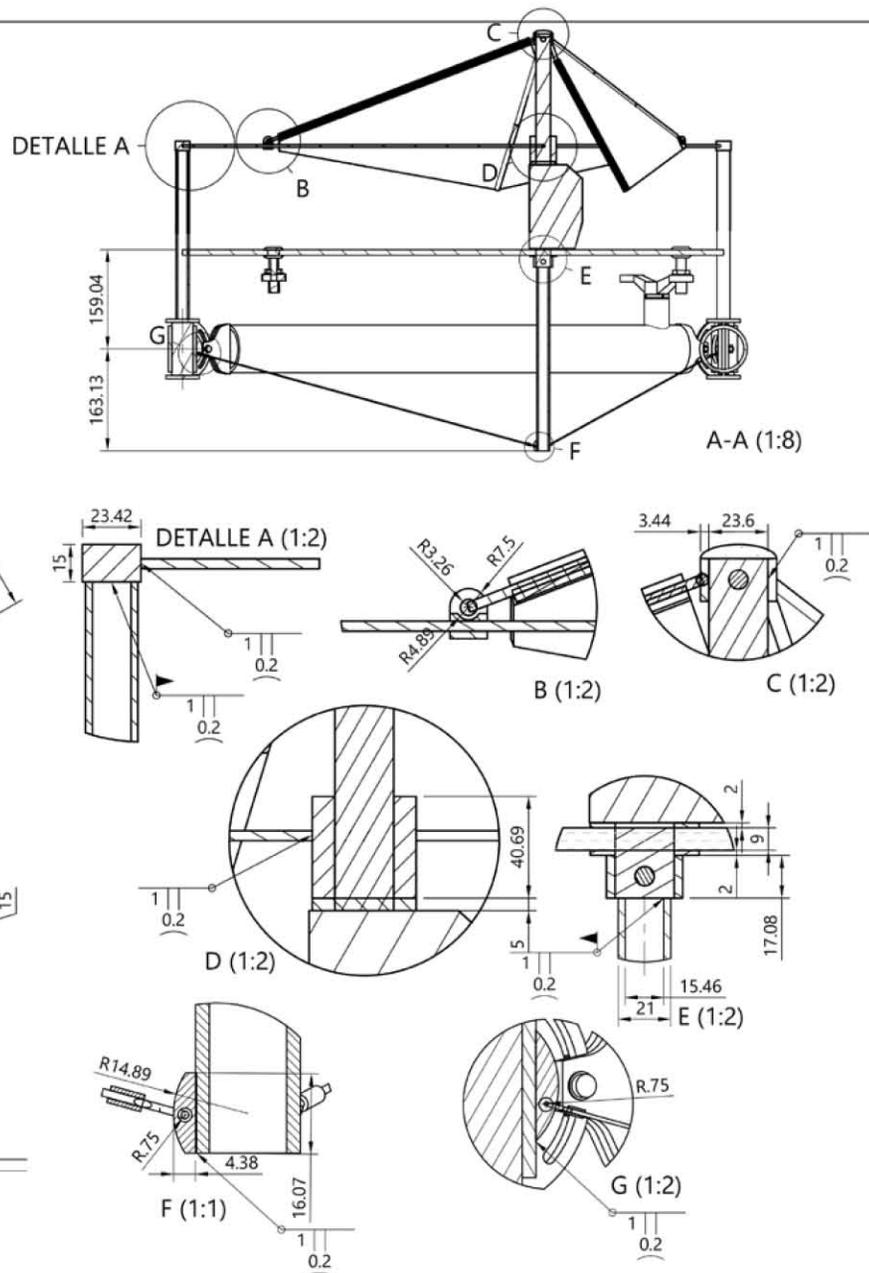
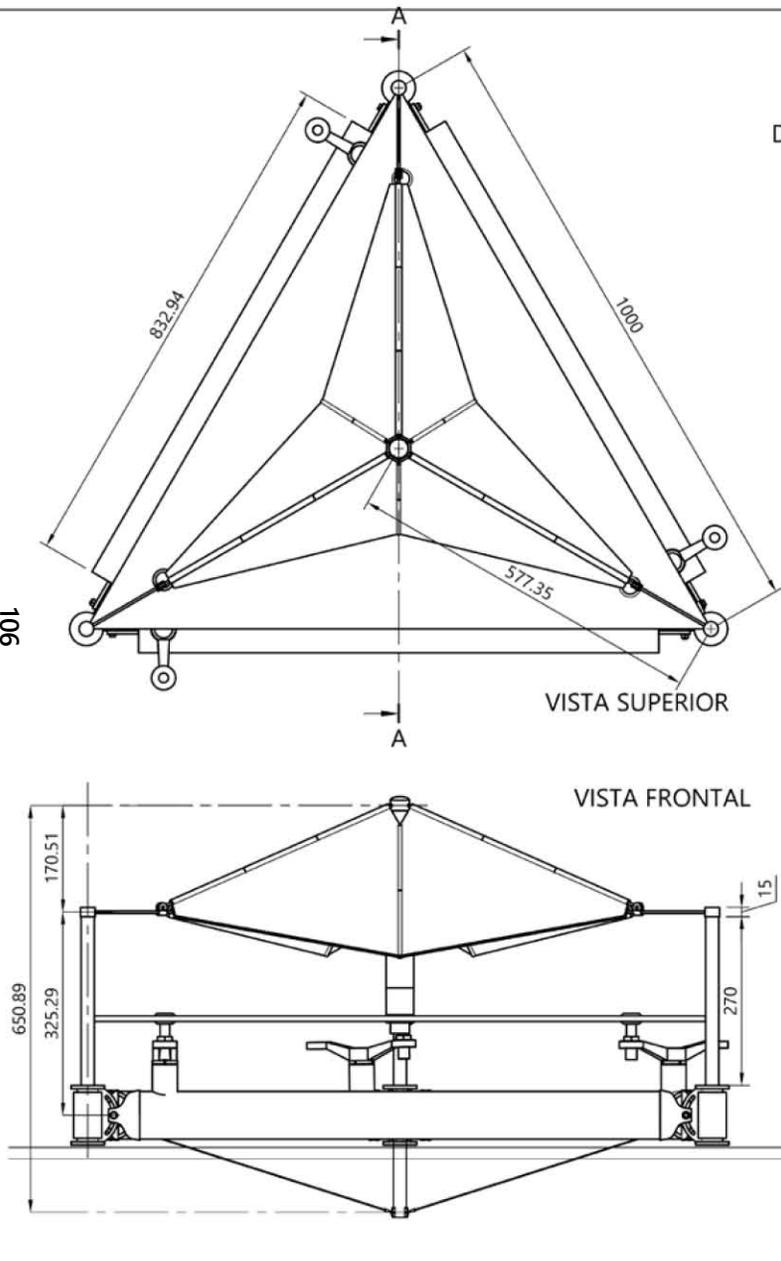
Se llevaron a cabo diversos estudios geométricos y mecánicos en donde prevaleció la solución de 6 módulos triangulares móviles a partir de la subdivisión equilátera del nivel anterior inmediato con paneles de vidrio. El contar con una definición no lineal de *Grasshopper* sino iterativa, permitió la observación en tiempo real del sistema y modificarlo para lograr cubrir con las premisas de diseño, así como simular por modelos físicos distintos movimientos individuales y colectivo del sistema para encontrar congruencia y poder determinar los elementos constructivos reales y sus implicaciones materiales.

Se sumaron los pesos de cada elemento y se multiplicó por la cantidad total a colocar para estudiar dentro de *Karamba3D* como un valor constante en toda la cubierta y revisar su viabilidad y sinergia con la estructura portante de barras y nodos. Es necesario recordar que si bien se realizó un ajuste en la geometría para encontrar distancias y dimensiones iguales el 66.30 % si cumplen con dicha premisa, sin embargo, el tipo de división para encontrar y desarrollar los módulos mecánicos es aplicable con ayuda de la definición al resto de los miembros sin poner en detrimento su implementación y movimiento.

Como se mencionó anteriormente, se cuentan con dos tipos diferentes de módulos triangulares, sólido y multiperforado, fue así como se planteó para el proyecto una zonificación sobre la cubierta según el espacio interior a adaptar. Se determinó una nomenclatura para denominar los dos tipos de módulos, así como de la presencia o ausencia de vidrio por debajo en el nivel intermedio. Se estudiaron las características a heredar para cada uno de los cuatro casos: paso de luz, agua, viento y cambio de temperatura. Se realizó una matriz sencilla de relación entre ellas para determinar sinergias y finalmente, se determinaron las mejores opciones para cubrir cada zona. (Fig. 51, pág. 111)

Figura 51: Nomenclatura de módulos mecánicos adaptables, relaciones entre éstos y placas de vidrio de nivel intermedio. 4 opciones de cobertura y zonificación sobre planta de conjunto según uso en el interior. Propia. (2024)





- DIBUJOS EN ISOMETRÍA
- COTAS (PREZOS) EN ARABIGOS
- ANGLAS EN GRADOS
- NOTAS ISOMÉTRICAS A ESCALA DE 0.5x PLANO
- ESCALA INDICADA EN EL RE EN PLANO O DIRECTAMENTE EL DIBUJO DE SER NECESSARIO
- VERIFICAR DIMENSIONES Y REVISAR CON EL LEVANTAMIENTO GEOMÉTRICO Y PROYECTO ARQUITECTÓNICO
- LAS APLICACIONES QUE SEAN EN LOS PLANOS SE INDICARÁN EN EL ESPACIO DE CUBIERTAS ANTES DE LOS PLANOS
- EN LOS SITIOS DONDE NO SE MUESTREN DETALLES CONSTRUCTIVOS, SE DEBERÁN ADAPTAR A ALGUNO SIEMPRE MOSTRADO EN LOS PLANOS O ISOMETRÍA.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ARQUITECTURA
PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA
ESPECIALIZACIÓN EN DISEÑO DE CUBIERTAS LIGERAS

TRABAJO TERMINAL EDCL

ARG. ESP. MARCOS JAVIER ONTIVEROS HERNÁNDEZ
DL. JUAN GERARDO OLIVA SALINAS
MTRO. MIGUEL ENRIQUE SÁNCHEZ HERNÁNDEZ

RODOLFO RODRÍGUEZ MUÑOZ

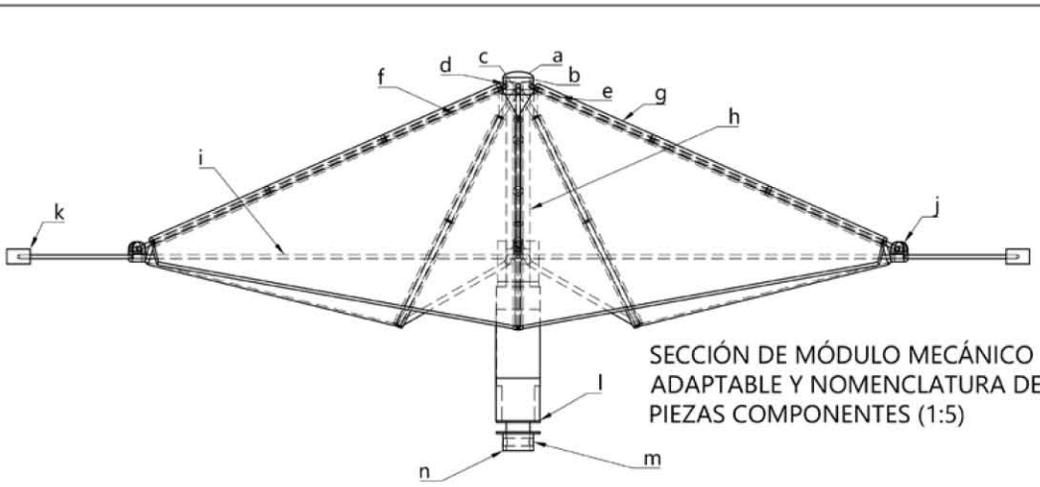
CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES

PROYECTO DE DISEÑO DE CUBIERTAS LIGERAS

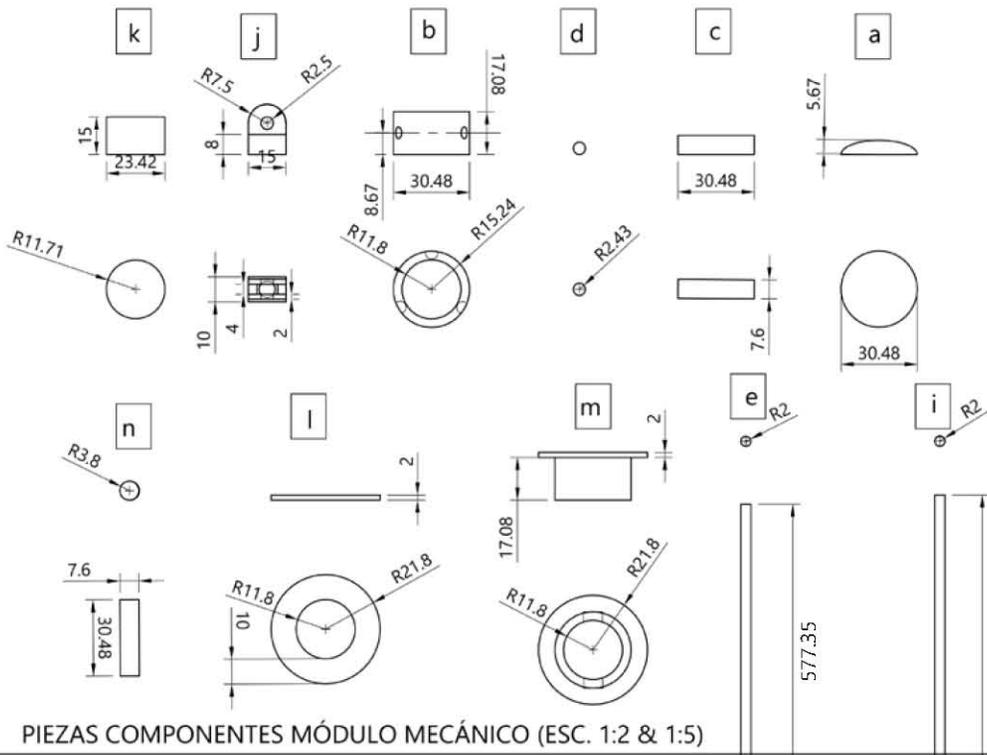
PROYECTO DE DISEÑO DE CUBIERTAS LIGERAS

Módulo mecánico adaptable

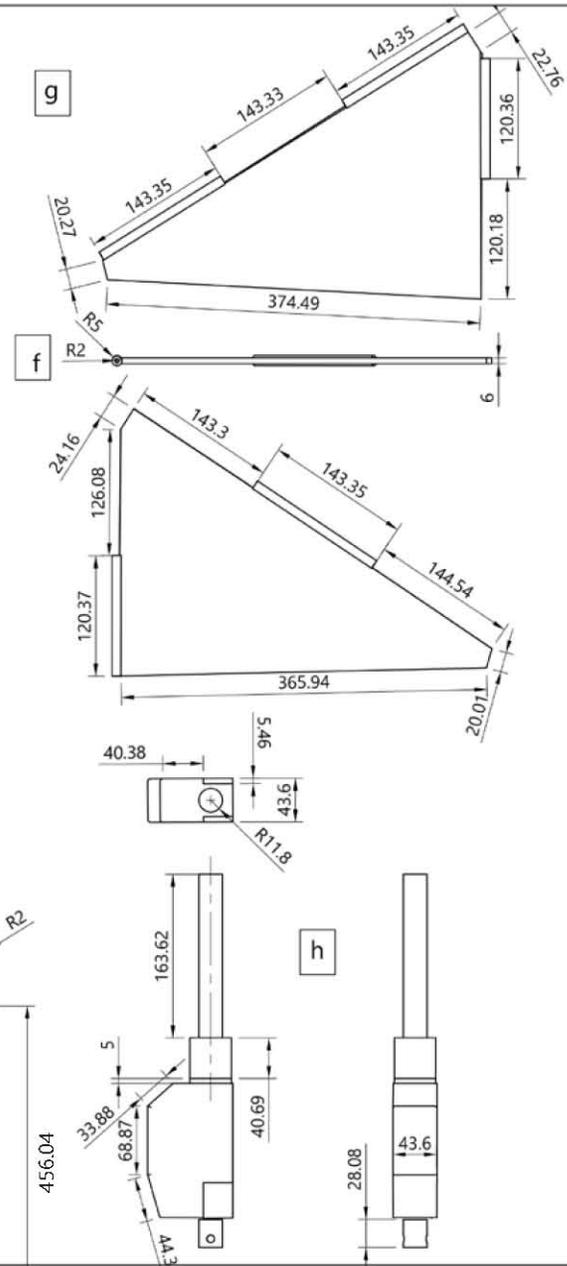
CL - 14



SECCIÓN DE MÓDULO MECÁNICO ADAPTABLE Y NOMENCLATURA DE PIEZAS COMPONENTES (1:5)



PIEZAS COMPONENTES MÓDULO MECÁNICO (ESC. 1:2 & 1:5)

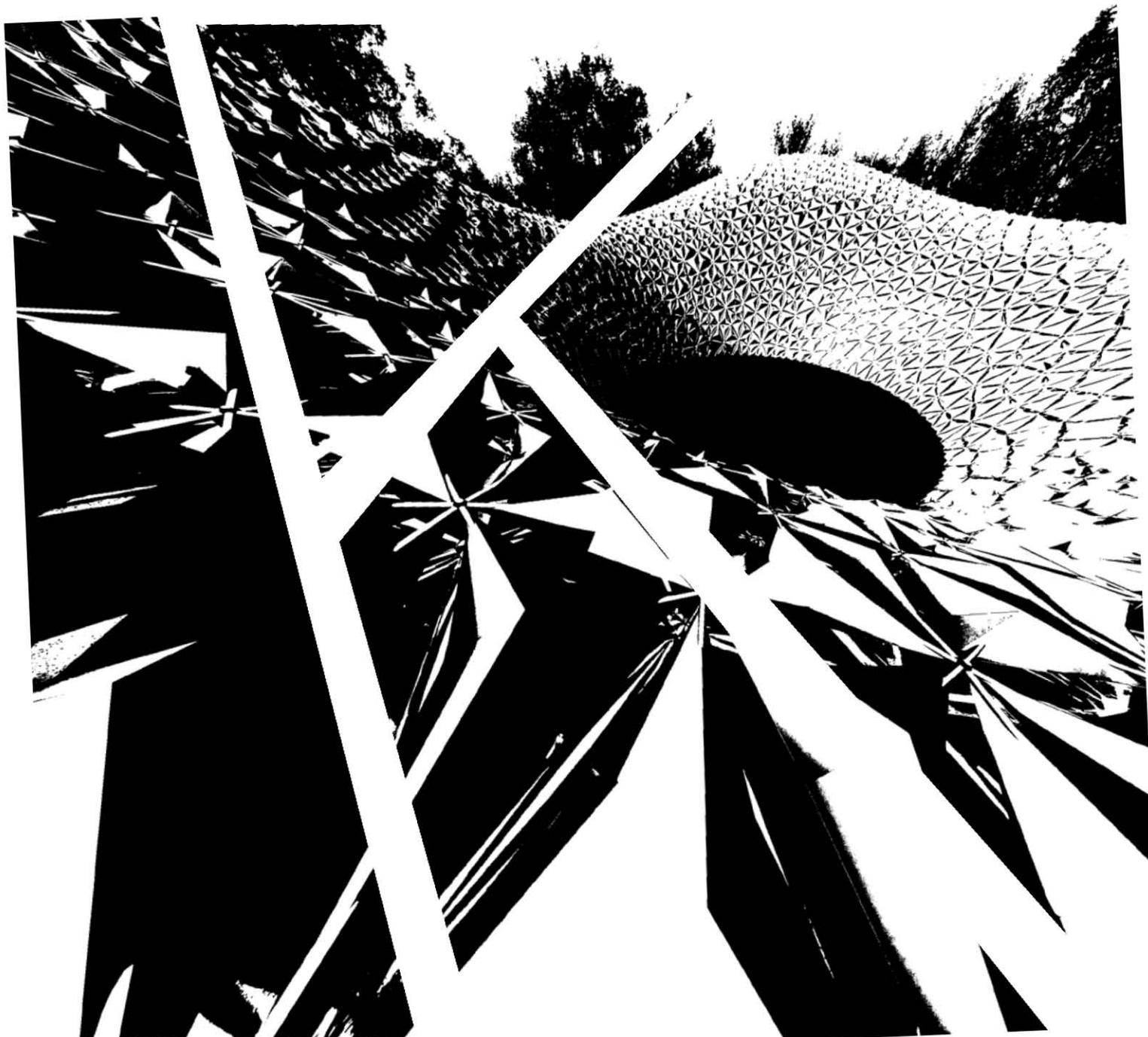


107

<p>CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES</p>	
<p>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ARQUITECTURA PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA ESPECIALIZACIÓN EN DISEÑO DE CUBIERTAS VERDES</p>	
<p>TRABAJO TERMINAL EDCL</p>	
<p>ARQ. ESP. MARCOS JAVIER ONTIVEROS HERNÁNDEZ DR. JUAN GERARDO OLIVA SALINAS MTRO. MIGUEL ENRIQUE SÁNCHEZ HERNÁNDEZ RODOLFO RODRÍGUEZ MUÑOZ</p>	
<p>CUBIERTA HABITABLE ADAPTABLE ANTE CONDICIONES AMBIENTALES CAMBIANTES</p>	
<p>15</p>	



5. CONCLUSIONES



El objetivo general y particulares de este documento quedan cubiertos cabalmente al presentarse una cubierta y estructura ligera autoportante de gran claro resuelta por medio de barras y nodos ajustables, con una teselación de paneles triangulares coplanares combinada con la aplicación de un sistema de módulos mecánicos adaptables de respuesta automática para preservar la habitabilidad al interior ante condiciones exteriores variables. Por medio de una metodología cíclica e iterativa con herramientas digitales para encontrar y seleccionar de entre una serie de múltiples posibles respuestas la que mejor se adaptara a la problemática estudiada en tiempo real.

Se dividieron y estudiaron los análogos de esta tipología cronológicamente en dos tipos: Enfocados en control térmico-ambiental y enfocados en la adaptabilidad. Se realizó un análisis comparativo de dichas edificaciones obteniendo elementos comunes a ellas y diferenciales. Así como ventajas y desventajas de los sistemas utilizados por cada una de estas. Teniendo siempre en cuenta el momento en el tiempo y recursos con los cuales se contaron al momento de su construcción.

Se recopiló información de artículos de divulgación científica, así como disponibilidad en el mercado para conocer los materiales, herramientas, sistemas estructurales y software utilizados en la resolución contemporánea en construcciones de este tipo. Para buscar aplicar la mejor solución a la problemática de estudio.

Dicha información antes mencionada se reflejó en una serie de diagramas filogenéticos como herramienta para buscar áreas de oportunidad en 8 temas principales que comparten las edificaciones con la tipología y temática estudiada. Es así como se identificaron relaciones lineales y cruzadas adecuadas para resolver el proyecto conceptual y las intenciones de diseño en el objetivo y problemática descritos.

Se realizó la búsqueda de la forma con el apoyo de *RhinoVAULT 2* para estructuras funiculares. Pensado siempre para satisfacer las necesidades del programa arquitectónico que se planteó por motivo de demostrar la viabilidad y adaptabilidad de la metodología. Una vez obtenida la geometría deseada se procedió a desarrollar un algoritmo capaz de re-geometrizarse la malla proveniente del paso anterior. Dicho algoritmo debía tener la posibilidad de mostrar todos los elementos constructivos de manera conceptual y parametrizar sus dimensiones con el fin de ser evaluados con la ayuda de *Karamba3D*, extensión capaz de mostrar de manera gráfica los esfuerzos presentes en la geometría, la cual se esperaba y se comprobó a compresión por su forma. A la par del desarrollo del algoritmo, se diseñaron los detalles y elementos constructivos como el nodo ajustable, basado en el desarrollado dentro del Laboratorio de Estructuras Ligeras, teniendo el propuesto la característica de recibir hasta 7 barras sin algún tipo de contacto entre sí. Incluido el programa se ubicaron los paneles triangulares y a la par se diseñaron los detalles de conexión entre esta segunda capa y la estructura.

Finalmente, y como una de las inquietudes principales a resolver del proyecto se dotó la capacidad al algoritmo de agregar una tercera capa con un módulo mecánico adaptable de respuesta automática de apertura y cierre a lo largo de toda la cubierta. Se cuidó que simulara dicha acción con el fin de comprobar su viabilidad geométrica y espacial. Se logró realizar la lectura y escritura de datos con la implementación de sensores y actuadores del mundo real al algoritmo, permitiendo no sólo modificar en tiempo real el modelo digital sino también un módulo a escala 1:5 de la cubierta. Comprobando así su correcto funcionamiento con las piezas propuestas para su armado.

En conjunto y a la par del modelado, generación del algoritmo y maqueta se elaboró una propuesta arquitectónica y constructiva a

detalle con el fin de acompañar y justificar un uso posterior de dicha metodología. El proyecto incluye los espacios congruentes para albergar en su interior un hábitat de supervivencia a mediano plazo guardando el confort para sus usuarios.

Como se ha mencionado a lo largo del texto, la temática en este punto no buscaba el emplazamiento en una ubicación específica, sino la búsqueda y experimentación de la aplicación de nuevos sistemas y materiales para resolver la problemática de una cubierta ligera de gran claro mecánicamente adaptable, objetivo que se estudia a cabalidad en el documento. La metodología y herramientas aplicadas en este proyecto tienen la característica de no ser lineales, por el contrario, la respuesta final y el algoritmo tienen de la capacidad de ser iterativos y cíclicos de manera no destructiva, más bien generativa. Esta metodología permite estudiar un sinnúmero de resultados en tiempo real.

Por lo que naturalmente el siguiente paso sería el de la etapa de lectura y escritura de datos a partir del modelo para fabricación, construcción e instalación a escala real. Actualmente es imperante la necesidad de aplicación de tecnologías BIM (*Building Information Modeling*) en la construcción para reducir el uso de recursos a toda escala. Cada día se desarrollan más componentes y aplicaciones de todo tipo para la rama del diseño y construcción. En este punto es valioso recordar que un programa ayuda a diseñar una cubierta/estructura, pero lo único que garantiza su estabilidad y realización congruente es la suma de sus elementos como un sistema estructural. Se pueden conocer y manejar muy bien dichas herramientas, pero el punto diferencial será el cómo se traslada dicha información al resto de las especialidades para dar el paso del mundo digital al físico.

El presente Trabajo Terminal representa la conclusión del análisis, síntesis y aplicación de

los conocimientos y herramientas adquiridos no sólo en la Especialización en Diseño de Cubiertas Ligeras, sino también de la estancia durante 4 fantásticos años en el Laboratorio de Estructuras Ligeras de la Facultad de Arquitectura de la UNAM.

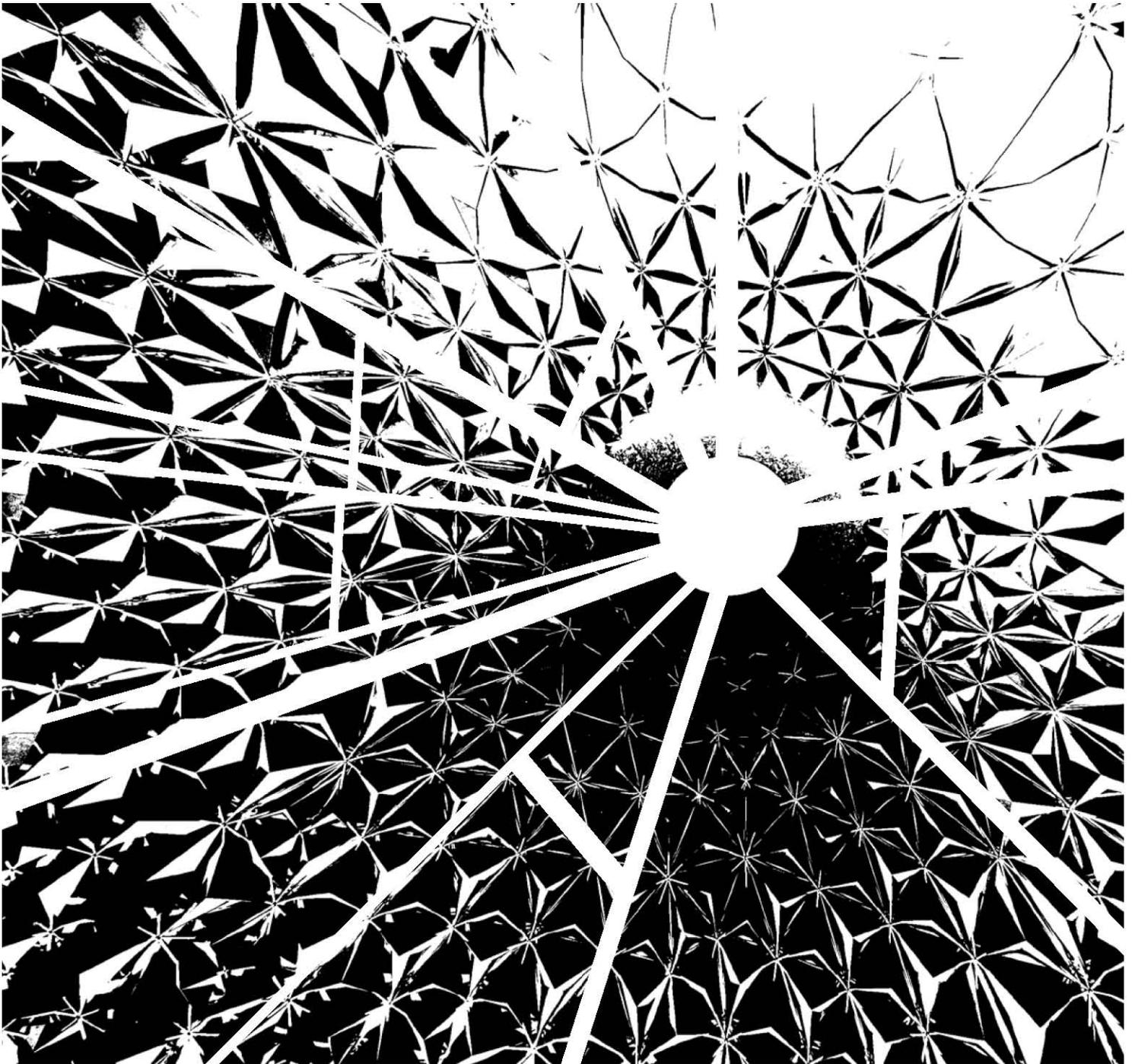
Gracias al apoyo del doctor Juan Gerardo Oliva Salinas, el arquitecto Especialista Marcos Javier Ontiveros Hernández, los docentes y colaboradores del Laboratorio y Especialización, así como al Programa de Apoyos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la DGAPA, UNAM.

Dicho privilegio de colaborar con el Laboratorio no sólo me permitió concluir mi formación escolar, sino que abrió y dirigió mi camino al siempre cambiante y sorprendente mundo de las estructuras y cubiertas ligeras. Tener la posibilidad de conocer a los autores que encabezan las innovaciones de esta rama, asistir a congresos para enriquecer lo ya conocido, participar en el desarrollo y construcción de algunos modelos a escala y 1:1 para aplicar lo aprendido, colaborar como coautor en un Paper de divulgación científica y hoy estar desarrollándome profesionalmente en el extranjero aplicando lo ya aprendido en el ámbito laboral, siempre con miras de seguir preparándome, conocer y mejorar aún más.

Se puede y debe continuarse por el camino de entender a la geometría, a la fabricación digital y a los procesos algorítmicos-iterativos como aliados en el diseño y construcción no solo de cubiertas de gran claro, sino también como herramienta y elemento dentro de otros sistemas constructivos. Su correcta y cabal aplicación tendrá como resultado que la estructura trabaje por forma y no por masa, así como construir más con menos. Que permita tener un amplio abanico de posibilidades de respuesta a problemas más complejos en menos tiempo. Con la ineludible responsabilidad de siempre tener una conciencia enfocada al diseño arquitectónico y estructural sostenibles.



6. REFERENCIAS



6.1 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS FÍSICAS Y DIGITALES

1. C.R. Calladine (1977), Buckminster Fuller's "Tensegrity" Structures and Clerk Maxwell's Rules for the Construction of Stiff Frames, Int. 1. Solids Structures. 1978. VoJ. 14, pp. 161-172, University of Cambridge, Department of Engineering, UK.
2. Buckminster Fuller Institute, About Fuller: Geodesic Domes. Retomado de: <<https://www.bfi.org/about-fuller/big-ideas/geodesic-domes>>
Architectural Digest (2016), Buckminster Fuller's Geodesic Dome and Other Forward-Looking Architecture, Retomado de: <<https://www.architecturaldigest.com/gallery/buckminster-fuller-architecture>>
3. ArchDaily (2014), AD Classics: Montreal Biosphere / Buckminster Fuller. Retomado de: <<https://www.archdaily.com/572135/ad-classics-montreal-biosphere-buckminster-fuller>>
4. Espace Pour la Vie Montréal, History of the Biodome. Retomado de: <<https://espacepurlavie.ca/en/biodome>>
5. AZPML, Migration du Biodome. Retomado de: <<https://azpml.com/#/projects/migration-du-biodome/609?q=biodome>>
6. Concrete Construction (1976), 1976 Olympics Velodrome. Retomado de: <https://www.concreteconstruction.net/how-to/construction/1976-olympics-velodrome_o>
7. Haeckels, The Biodomes: Wildlife Conservation Center, retomado de: <<https://haeckels.co.uk/journal/the-biodomes-wildlife-conservation-centre/>>
8. The Structural Making of the Eden Project Domes by KLAUS KNEBEL, JAIME SANCHEZ-ALVAREZ, STEFAN ZIMMERMANN, MERO GmbH & Co. KG, D-97084 Würzburg, Germany
9. Lehnert S. (2000)Das Eden Projekt ; Intelligente Architektur; Ausgabe.
10. Alan C, Jones (2000): Civil and Structure Design of the Eden Project, International Symposium on Widespan Enclosures at the University of Bath.
11. K. Knebel, J. Sánchez-Álvarez (2001), The structural making of the Eden Domes. SPACE Feeling. 2001. MERO GmbH & Co. Würzburg, Germany.
12. Istructe Structural Awards (2013), Submission by Atelier One Gardens by the Bay, Singapore cooled conservatories, supertrees and aerial walkways, Retomado de: <http://www.solaripedia.com/files/1262.pdf>
13. ArchDaily (2013), Cooled Conservatories at Gardens by the Bay / Wilkinson Eyre Architects, Retomado de: <https://www.archdaily.com/324309/cooled-conservatories-at-gardens-by-the-bay-wilkinson-eyre-architects?ad_medium=gallery>

14. ArchDaily, En Construcción: Gardens by the Bay + Supertrees / Wilkinson Eyre + Grant Architects, Retomado de: <<https://www.archdaily.mx/mx/02-127893/en-construccion-gardens-by-the-bay-supertrees-wilkinson-eyre-grant-associates>>
15. Állatkert Budapest szíbében, Milyen lesz a Pannon Park?, Retomado de: <<https://zoobudapest.com/pannonpark/pannon-park/milyen-lesz>>
16. Tervlap. Hu., Dr. Reith András szakmai betmutatója a Biodómról, Retomado de: <<https://tervlap.hu/cikk-nezet/dr-reith-andras-szakmai-bemutatoja-a-biodomrol>>
17. Index, Elképesztően brutálisan nagy lesz az állatkert biodómja, Retomado de: <<https://index.hu/techtud/2018/12/14/elkepesztoen-brutalisan-nagy-lesz-az-allatkert-biodomja/>>
- 18.The Spheres, Explore the Building. Retomado de: <<https://www.seattlespheres.com/explore-the-building>>
19. ArchDaily, Amazon Spheres / NBBJ. Retomado de: <<https://www.archdaily.mx/mx/936526/esferas-de-amazon-nbbj>>
20. Institut du Monde Arabe, Architecture, Retomado de: <<https://www.imarabe.org/fr/architecture>>
21. ArchDaily, Las Torres Al Bahar y su fachada sensible, por Aedas Architects, Retomado de: <<https://www.archdaily.mx/mx/02-226760/las-torres-al-bahar-y-sus-fachadas-sensibles-por-aedas-architects>>
22. DOSU Studio, Bloom, Retomado de: <<https://www.dosu-arch.com/bloom>>
23. ArchDaily, Bloom / DO/SU Studio, Retomado de: <https://www.archdaily.com/215280/bloom-dosu-studio-architecture?ad_medium=gallery>
24. S. Bahl. et al (2020), Smart materials types, properties and applications: A review. Materials Today. 2020 Vol. 28. Gujral Punjab Technical University, India.
25. Yingying Li, Xue Gu, He Gao, Jian Li (2020), Photoresponsive wood composite for photoluminescence and ultraviolet absorption, Construction and Building Materials 261 (2020) 119984, College of Material Science and Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, China.
26. G. Oliva, M. Trujillo, S. Ezeta, R. Abud, M. Verhulst (2022), Bamboo gridshells for rural housing in Mexico. Proceedings of IASS Annual Symposia, IASS/APCS 2022 Beijing Symposium: Innovation in New Concepts and Projects, pp. 1-9(9). Ciudad de México, México.

27. P.P. Psyllaki. et al (2013), Degradation of stainless steel grids in chemically aggressive environments. *Engineering Failure Analysis*. 2003. Vol. 35. Technological Education Institute of Piraeus, Greece.
28. R. Feng. et al. (2018), Static performance of double-ring joints for freeform single-layer grid shells subjected to a bending moment and shear force. *Thin-Walled Structures*. 2018. Vol. 131. The Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of the Ministry of Education, Southeast University, China.
29. P.W. Griffiths, P.C. Eames. (2007), Performance of chilled ceiling panels using phase change materials slurries as the heat transport medium. *ScienceDirect: Applied Thermal Engineering*. 2007. Vol. 27. Centre for Sustainable Technologies, University of Ulster, United Kingdom.
30. Dong Wang, Liqiang Xu, Lun Zhang, Lanshan Zhang, Aimin Zhang (2020), Hydrophobic/superhydrophobic reversible smart materials via photo/thermo dual-response dynamic wrinkled structure, *Chemical Engineering Journal*, State Key Laboratory of Polymers Materials Engineering of China, Polymer Research Institute of Sichuan University, China.
31. Farah Souayfane, Farouk Fardoun, Pascal-Henry Biwole (2016), Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review, *Energy and Buildings* 129 (2016) 396-431, University Institute of Technology, Libano.
32. R.S. Zakirullin (2020), Chromogenic materials in smart windows for angular-selective filtering of solar radiation, *Materials Today Energy* 17 (2020) 100476, Orenburg State University, Russia.
33. Yahya S. Abdullah, Hoda A.S. Al-Alwan (2019), Smart material systems and adaptiveness in architecture, *Ain Shams Engineering Journal* 10 (2019) 623–638, Department of Architecture/College of Engineering, University of Baghdad, Baghdad, Iraq.
34. Alvaro de Gracia, Joan Tarragona, Alicia Crespo, César Fernández, (2020), Smart control of dynamic phase change material wall system., *Applied Energy* 279 (2020) 115807. GREiA Research Group, INSPIRES Research Centre, Universitat Lleida, España.
35. Decamps, B. (2014), *Computational Design of Lightweight Structures. Form Finding and Optimization*, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., UK, USA.
36. Pedro G., Lucas M., Paulo S. (2012), *Structural Connections for Lightweight Metallic Structures*, Springer, UK.

Referencias bibliográficas consultadas adicionalmente, no contenidas directamente en el texto.

Muhammad Altaf Araina,,William James Shuttleworth, Blake Farnsworth,John Adams, Omer Lutfi Sen (1999), Comparing micrometeorology of rain forests in Biosphere-2 and Amazon basin, *Agricultural and Forest Meteorology* 100 (2000) 273–289, University of Arizona, USA.

Nelson, M. (2018), Pushing our limits: Insights from Biosphere 2, University of Arizona Press, Arizona.

Bernd Zabel, Phil Hawes, Hewitt Stuart, Bruno D.V. Marinob (1999), Construction and engineering of a created environment: Overview of the Biosphere 2 closed system, Biosphere 2 Center, Oracle, Arizona; Department of Earth and Planetary Sciences, Harvard University, Massachusetts.

B. Zabel, P. Hawes (1998), Construction and engineering of a created environment: Overview of the Biosphere 2 closed system. Ecological Engineering. 1999 Vol. 13. Harvard University, USA.

M.A. Arain. et al. (2000), Comparing micrometeorology of rain forests in Biosphere-2 and Amazon basin. Agricultural and Forest Meteorology. 2000. Vol. 100. Institute for the Study of Planet Earth, The University of Arizona, USA.

Moss Amsterdam, ALDIN Biodome, retomado de:
<http://www.moss.amsterdam/portfolio_page/aldin-biodome/>

D SC + RN, The Shed NY, Retomado de:
<<https://dsrny.com/project/the-shed?index=false§ion=projects>>

H.S.M. Shahin (2019), Adaptive building envelopes of multistory buildings as an example of high performance building skins. Alexandria Engineering Journal. 2019. Vol. 58. Alexandria University, Egypt.

Jianying Hu, Xiong (Bill) Yu (2020), Adaptive building roof by coupling thermochromic material and phase change material: Energy performance under different climate conditions, Construction and Building Materials 262 (2020) 120481, School of Transportation, Southeast University, China, Case Western Reserve University, USA.

J. Cook. (1996). Architecture indigenous to extreme climates. Energy and Buildings. 1996. Vol. 21. Arizona State University, USA.

Borui Xu, Xinyi Lin, and Yongfeng Mei, (2020), Versatile Rolling Origami to Fabricate Functional and Smart Materials, Cell Reports Physical Science 1, 100244, Noviembre 18, 2020, Department of Materials Science, State Key Laboratory of ASIC and Systems, Fudan University, Shanghai, China.

Shashi Bahl, Himanshu Nagar, Inderpreet Singh, Shankar Sehgal, (2020), Smart materials types, properties and applications: A review, Materials Today: Proceedings 28 (2020) 1302–1306, Department of Mechanical Engineering, I.K. Gujral Punjab Technical University Hoshiarpur Campus, India.

Meng Zhen, Qi Dong, Min Xu, Ying Liu, Hongrui Zhang, Yongheng Jia, Bin Yang (2021), Thermal benefit of igloos in extremely cold conditions in Harbin, China, Building and Environment 190 (2021) 107546,, Xi'an Jiaotong University, Harbin Institute of Technology, China.

6.2 HERRAMIENTAS

Rhinoceros 3D v.7, & Grasshopper para Rhinoceros 7, Descargado de:
<<https://www.rhino3d.com/es/>>

RhinoVAULT 2, Descargado de:
<<https://blockresearchgroup.gitbook.io/rv2>>

Kangaroo Physics v.0.99, Descargado de:
<<https://kangaroo3d.com/>>

Weaverbird v. 0.9.0.1, Descargado de:
<<https://www.giuliopiacentino.com/weaverbird/>>

Plankton v0.4.2, Descargado de:
<<https://github.com/meshmash/Plankton/releases>>

Firefly v. 1.0.0.70, Descargado de:
<<https://www.fireflyexperiments.com/>>

Arduino IDE 2.3.2, Descargado de:
<<https://www.arduino.cc/en/software>>

Karamba3D 2.2.0 Rhino7, Descargado de:
<<https://karamba3d.com/>>

6.2.1 RECURSOS HERRAMIENTAS

37. Apuntes en la participación del Workshop "*DigitalFUTURES: RhinoVAULT2*". Block Research Group. DigitalFUTURES Association, 27 de junio al 3 de julio de 2020. (En línea).

38. Rippmann, M., Lachauer, L. y Block, P. *Interactive Vault Design. International Journal of Space Structures.* (27), No.4, 2012.

39. MeshMachine, apuntes, Retomado de:
<<https://spacesymmetrystructu12re.wordpress.com/2012/09/20/meshmash/>>

6.3 REFERENCIAS DE FIGURAS

Nota: Las imágenes, figuras y esquemas del capítulo 2.1 *Edificaciones análogas* se encuentran debidamente referenciadas a pie de página.

Figura 1: Propia. (2022). *Ejemplo sintetizado de diagrama filogenético para lectura y referencia* [Figura].

Figura 2: Propia. (2022). *Definición de metodología esferas por diagrama filogenético* [Figura].

Figura 3: Propia. (2022). *Diagrama filogenético final del proyecto* [Figura].

Figura 4: Propia. (2022). *Comparativa de diagramas filogenéticos* [Figura].

Figura 5: Propia. (2020). *Diagramas recíprocos de forma y fuerza en RhinoVAULT* [Figura].

Figura 6: Propia. (2022). *Estudios de generación de planta por medio de intersección y adición de circunferencias* [Figura].

Figura 7: Propia. (2022). *Superficie y malla coplanares base* [Figura].

Figura 8: Propia. (2023) *Diagramas recíprocos de forma y fuerza del proyecto* [Figura].

Figura 9: Propia. (2023). *Diagrama de empuje en el eje "Z"* [Figura].

Figura 10: Propia. (2023). *Geometría a compresión pura final* [Figura].

Figura 11: N/D. (2012). *Operaciones de triangulación de malla*. Retomada de: <<https://spacesymmetrystructu12re.wordpress.com/2012/09/20/meshmash/>> [Ilustración].

Figura 12: Propia. (2023). *Vista de re-geometrización en sección de malla a distancia nodal de 0.90 m* [Figura].

Figura 13: Propia. (2023). *Nueva malla teselada con los parametros deseados* [Figura].

Figura 14: Propia. (2023). *Barras y nodos conceptuales parametrizados desde Grasshopper* [Figura].

Figura 15: Propia. (2023). *Movimientos concéntricos como premisa de diseño del nodo* [Figura].

Figura 16: Propia. (2023). *Piezas que conforman el nodo. Vistas en planta y alzado frontal* [Figura].

Figura 17: Propia. (2023). *Ángulo máximo de apertura de nodo* [Figura].

Figura 18: Propia. (2023). *Proceso de ensamblaje conceptual de nodo* [Figura].

Figura 19: Propia. (2023). *Piezas que conforman la conexión entre nodo y barra*. [Figura].

Figura 20: Propia. (2023). *Isométrico de barras ensambladas al nodo* [Figura].

Figura 21: Propia. (2023). *Offset de la geometría principal a 15 cm con respecto a la normal perpendicular* [Figura].

Figura 22: Propia. (2023). *Piezas que conforman la sujeción entre vidrio y estructura portante* [Figura].

Figura 23: Propia. (2023). *Isométrico de módulo de estructura portante con sistema de arañas* [Figura].

Figura 24: Propia. (2022). *Dos estudios previos a propuesta final de módulo mecánico adaptable* [Figura].

Figura 25: Propia. (2023). *Estructura auxiliar para delimitar módulos* [Figura].

Figura 26: Propia. (2023). *Doble operación de compensar en el nivel de los módulos por encima de vidrio* [Figura].

Figura 27: Propia. (2023). *Subdivisión vértice . mitad de arista para generación de módulos individuales* [Figura].

Figura 28: Propia. (2023) *Superficies planas individuales a partir de divisiones para control de movimiento* [Figura].

Figura 29: Propia. (2023). *Dominio de apertura y cierre de módulos mecánicos adaptables conceptuales*[Figura].

Figura 30: Propia. (2023). *Piezas que conforman el módulo mecánico adaptable* [Figura].

Figura 31: Propia. (2023). *Dos tipos de módulo mecánico adaptable* [Figura].

Figura 32: Propia. (2023). *Placa de microcontrolador Arduino UNO, protoboard con resistencias y motor* [Figura].

Figura 33: Propia. (2023). *Programa dentro de la plataforma Arduino IDE en lenguaje C++ y esquema de conexión en microcontrolador* [Figura].

Figura 34: Propia. (2023). *Piezas individuales impresas en 3D con PLA para prototipo a escala* [Fotografía].

Figura 35: Propia. (2023). *Prototipo a escala ensamblado en su totalidad para revisar mecanismo* [Fotografía].

Figura 36: Propia. (2023). *Captura de movimiento de prototipo a escala con mecanismo Arduino UNO y motor* [Fotografía].

Figura 37: Propia. (2023). *Conexión física de circuito para dar lectura de valores de fotorresistencia para determinar ángulos de apertura en el modelo digital* [Figura].

Figura 38: Propia. (2023). *Designación de barras como elementos lineales para su evaluación dentro de Karamba 3D* [Figura].

Figura 39: Propia. (2023). *Determinación de cargas a estar presentes en la simulación de Karamba 3D.* [Figura].

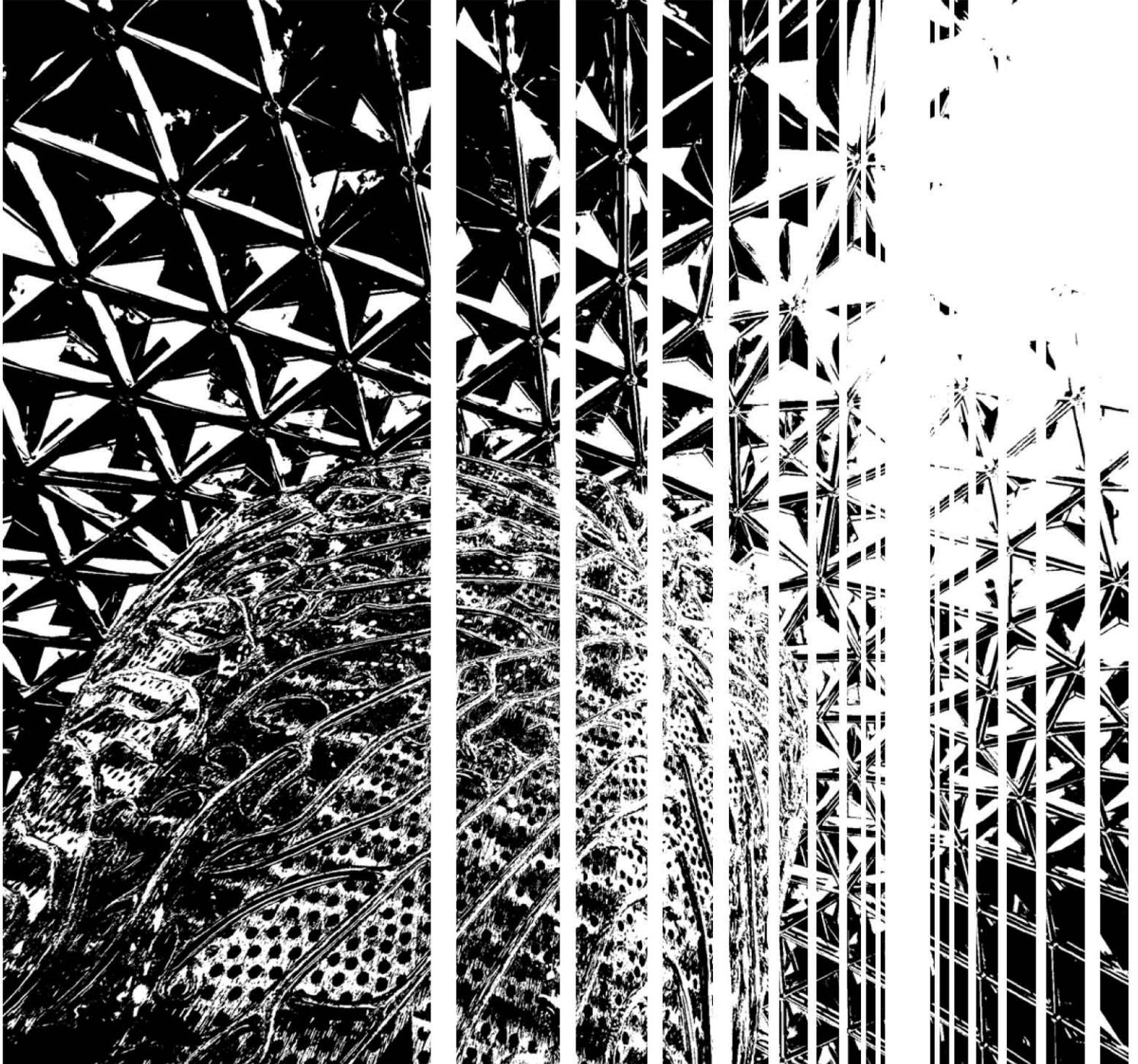
- Figura 40: Propia. (2023). *Visualización y filtrado de resultados de cálculo en Karamba 3D* [Figura].
- Figura 41: Propia. (2023). *Resultados de utilización y deformación de estructura en Karamba 3D* [Figura].
- Figura 42: Propia. (2023). *Esquema sintetizado de distribución de usuarios dentro del proyecto* [Ilustración].
- Figura 43: Propia. (2023). *Módulo mínimo de vivienda 3 m x 3 m* [Figura].
- Figura 44: Propia. (2023). *Diagrama de módulo, esqueleto y envolvente de PVC y textiles* [Figura].
- Figura 45: Propia. (2023). *Morfología de vivienda por número de habitantes* [Figura].
- Figura 46: Propia. (2023). *Esquema conceptual de porciones de comida* [Figura].
- Figura 47: Propia. (2023). *Contenedor reforzado de 1000 l de almacenamiento de agua* [Figura].
- Figura 48: Propia. (2023). *Esquema de funcionamiento de cultivo aeropónico* [Figura].
- Figura 49: Propia. (2023) *Esquemas conceptuales de compostador y planta de tratamiento de agua* [Figura].
- Figura 50: Propia. (2023). *Diagrama de zonas generales y áreas componentes* [Figura].
- Figura 51: Propia. (2024). *Nomeclatura de módulos mecánicos adaptables y su disposición en el proyecto* [Figura].

6.4 REFERENCIAS DE TABLAS

- Tabla 1: Propia (2022). *Parámetros a evaluar por el análisis de proyectos*. [Tabla].
- Tabla 2: Propia (2022). *Diagrama filogenético del Proyecto Edén*. [Tabla].
- Tabla 3: Propia (2022). *Diagrama filogenético final del proyecto*. [Tabla].
- Tabla 4: Propia (2023). *Gasto energético de equipo en el proyecto*. [Tabla].
- Tabla 5: Propia (2023). *Zonas generales y áreas componentes*. [Tabla].



7. ANEXOS



ANEXO 01: Definición paramétrica de Grasshopper como herramienta para resolución de cubierta adaptable Trabajo Terminal EDCL - Cubierta habitable adaptable ante condiciones ambientales cambiantes

NOTAS: Antes de correr la definición se deben tener instalados los siguientes Plug-ins:

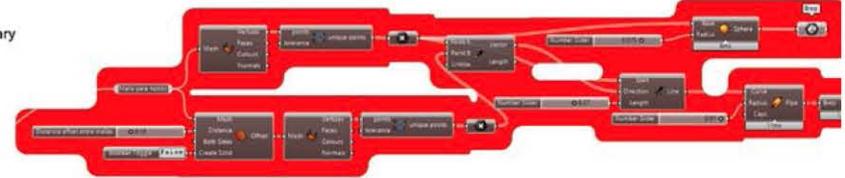
Kangaroo (0.99) - Para: MeshMachine, RemoveDuplicatePoints y Solver
 Weaverbird 0.9.0.1 - Para: Weaverbird's Split Triangles Suidivision, Weaverbird's Mesh Window y Weaverbird Naked boundary
 Plankton - Para: PlanktonMesh
 Firefly 1.0.0.67 - Para: Conexión Arduino UNO



124

2) Re-geometrización de Mesh de RhinoVAULT: Se agrega el grupo de mallas de VAULT, se unen entre si, se parten en caras triangulares y se re-geometriza con MeshMachine teniendo como parámetros: distancia nodal (promedio), adaptabilidad a curvatura (casi nunca necesaria), número de iteraciones para llegar a la solución (a mayor número Mesh Final más suave es, depende de la capacidad de procesador)

3) Generación visual del nodo: Se toman los vertices de la nueva Mesh, se genera un offset para encontrar puntos los mismos para encontrar la Normal y los nodos apunten en la dirección correcta, finalmente se crean circunferencias



4) Modelado de barras: Se obtienen los vertices de la nueva Mesh y se le asigna un radio al Pipe para visualizarlos en el modelo final



5) Rearmado de Meshes como superficies sin rotar para uso a conveniencia (Placas de vidrio): Por medio de armar nuevas superficies a partir de los vertices de cada una de las Mesh nuevas



6) Determinación de tamaño de Módulos entre las barras (Prismas paño interior)



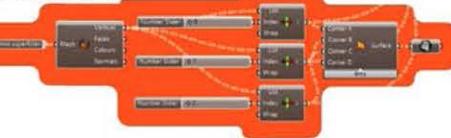
7) Armado de rearmado de por medio de de cada una c

Aquí se reemplaza las Meshes a unas con offset en sí mismas para generar el espacio entre barras
 NOTA: el offset no está en cm por lo que se deberá ajustar visualmente con respecto al diámetro de las barras con ayuda del grupo "4)" encendido

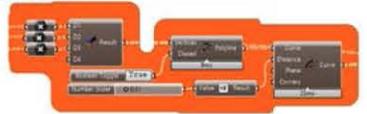
os desfasados, se crea un vector entre
rencias y se les da volúmen.



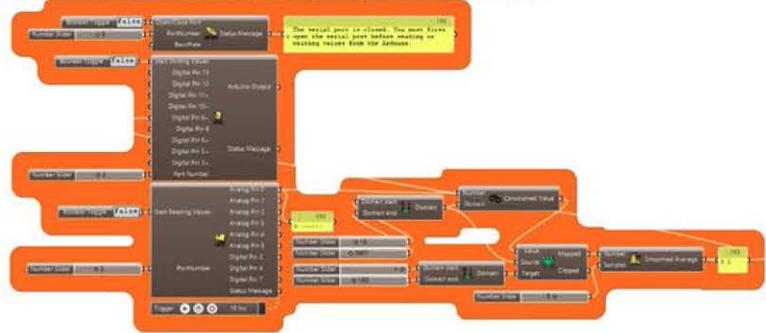
vértices que componen el módulo mecánico adaptable y
Meshes como superficies sin rotar para uso a conveniencia:
armar nuevas superficies a partir de los vértices
de las Mesh nuevas



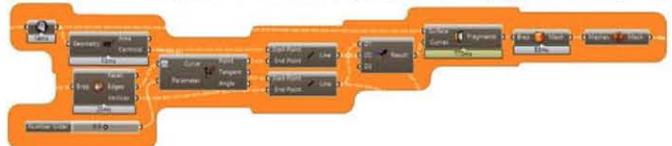
8) Unión de vértices de base de módulo mecánico adaptable
a polilíneas cerradas



9) Conexión de microcontrolador Arduino UNO por medio de Firefly, se
debe tener en cuenta el puerto de entrada del COM para lectura y escritura.
Se convierte valor de fotorresistencia para obtener ángulo de rotación de módulos



10) Armado de módulos mecánicos como una sola Mesh con el fin de convertirlos posteriormente
en geometrías con ciertas capacidades físicas, es decir, componentes con propiedades a simular por fuerzas en solver



12) Generación de estructura portante de módulos mecánico

11) Solver de Kangaroo Physics para sintetizar la información
de geometrías obtenidas por el armado anterior de los módulos
mecánicos, se le otorgan propiedades a los vértices como
puntos de anclaje así como inicios y final del movimiento de
doblez y a las aristas la propiedad de resorte en este caso
rígido para no perder geometría. Se obtiene el ángulo de
movimiento en tiempo real por medio de la lectura de Arduino UNO y
se sintetizan las fuerzas para visualizar el resultado también en tiempo real.

