



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA

Estructura arbórea para habilitar azoteas en  
edificios historicós

TRABAJO TERMINAL  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
ESPECIALISTA EN DISEÑO DE CUBIERTAS LIGERAS

PRESENTA:  
Ever Alejandro Pérez Ramírez

Director del Trabajo terminal:  
Dr. Agustin Hernández Hernández  
Facultad de Arquitectura



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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**

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES EN ARQUITECTURA

# **Estructura arbórea para habilitar azoteas en edificios históricos**

TRABAJO TERMINAL  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
ESPECIALISTA EN DISEÑO DE CUBIERTAS LIGERAS

PRESENTA:  
Ever Alejandro Pérez Ramírez

Sinodales:  
Dr. Agustín Hernández Hernández  
Dr. Juan Ignacio del Cueto  
Arq. José Luis Rincón Medina  
Arq. ECL. Marcos Ontiveros Hernández  
Arq. Natalia Boo Fontenla



# ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>Introducción...</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Objetivos...</b>	<b>2</b>
<b>3.</b>	<b>Antecedentes...</b>	
3.1.	Análogos	
	• Centro Cultural España	
	• Edificio "la Esmeralda"	
	• Restaurante "El Mayor"	
3.2.	Hipótesis	
<b>4.</b>	<b>Planteamiento de Diseño...</b>	<b>10</b>
4.1.	Preparación	
4.2.	Estructuras Arbóreas con nodos empotrados	
4.3.	Estructuras Arbóreas con nodos articulados	
<b>5.</b>	<b>Geometrización...</b>	<b>16</b>
5.1.	Cascarones Reticulados	
5.2.	Estructura Arbórea	
5.3.	Búsqueda de la Forma	
<b>6.</b>	<b>Anteproyecto...</b>	<b>24</b>
6.1.	Paraboloide	
6.2.	Estructura Arbórea	
<b>7.</b>	<b>Análisis de Materiales y Cargas</b>	<b>30</b>
<b>8.</b>	<b>Análisis Estructural...</b>	<b>34</b>
<b>9.</b>	<b>Factibilidad...</b>	<b>44</b>
<b>10.</b>	<b>Conclusión...</b>	<b>48</b>
<b>11.</b>	<b>Bibliografía...</b>	<b>50</b>

## Anexos

## **AGRADECIMIENTOS**

\_A mis padres Hugo Fernando y María Gina, porque de ellos es gran parte de mis éxitos.

\_A mis hermanos Hugo, Julio y Cynthia, por estar a cada paso de mi vida y en este más.

\_A Eva Maria y pollito por el cariño, la paciencia y el apoyo para concluir este proyecto.

\_A mis amigos Oscar y Brayan porque juntos avanzamos en la carrera.

\_Al Dr. Agustín Hernández, por la confianza vertida en mí en su momento, así como por cada pieza de conocimiento que me dio y sirvió para armar este trabajo.

\_Al Arq. Tonda Magallón y el Arq. Rincón por cada clase dada en la que termine boquiabierto de su extraordinaria cátedra.

\_Al Laboratorio de Estructuras que me abrió las puertas a nuevas geometrías de las que quede atrapado para siempre y porque me brindó la oportunidad de financiar estos estudios.

***“El nacimiento de un conjunto estructural, resultado de un proceso creador, fusión de técnica con arte, de ingenio con estudio, de imaginación con sensibilidad, escapa del puro dominio de la lógica para entrar en las secretas fronteras de la inspiración.”***

Eduardo Torroja Miret

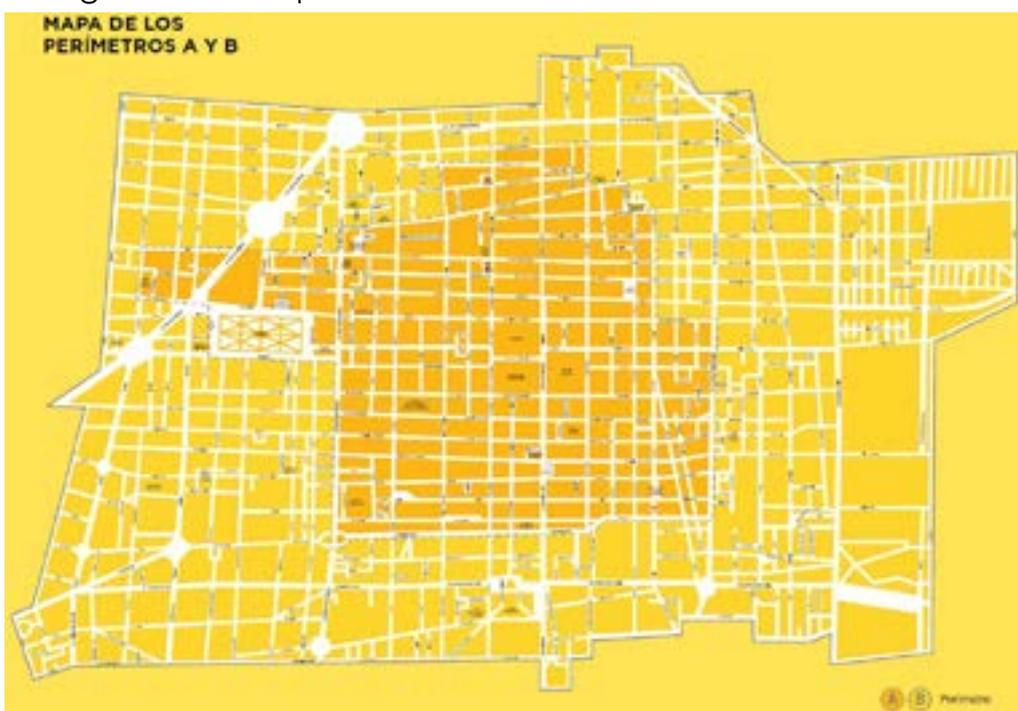
# 1. Introducción

El Centro Histórico de la Ciudad de México (CHCM) es el punto de referencia en diversos entornos dentro de la capital, el polígono protegido con base en la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Históricas y Artísticas, consta de dos zonas (A, el núcleo y B, como zona de amortiguamiento) que en total abarcan un área de 10 km<sup>2</sup>, casi 700 manzanas. Así de 9,000 inmuebles aproximadamente existentes en la actualidad, 3,000 de ellos se consideran protegidos por el INAH, INBA y la Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda (SEDUVI).

De igual manera, hoy en día en el CHCM se pueden encontrar gran cantidad de espacios destinados a satisfacer a toda clase de usuarios, siendo estos: templos religiosos, plazas, jardines, andadores, edificios de comercios u oficinas, museos, restaurantes, etc. Los cuales mantienen activo y viva a esta zona de la ciudad, pero esto no fue siempre así, Hasta el año 2000, la inaccesibilidad, inseguridad, la mala imagen, el deterioro, así como el abandono de los inmuebles, produjeron que un gran número de habitantes de esta ciudad se alejaran.

Para el 2001, bajo la creación de un Consejo Consultivo Ciudadano y con el Fideicomiso del Centro Histórico se inició la renovación de todo este espacio, se comenzó con el cambio de infraestructura urbana, se rehabilitaron sedes de antiguos bancos y oficinas para convertirlas en viviendas, se creó una nueva red de cableado, drenaje y telefonía, y se diseñaron nuevas formas y rutas de transporte público. Todas estas acciones que hoy en día siguen vigentes, lograron que los habitantes volvieran, pero sobre todo se demostró a la sociedad de que era posible salvar al CHCM.

Bajo este esquema, presento este proyecto, pues al lograr rescatar un edificio de carácter antiguo e histórico, dotarlo de servicios modernos y dando oportunidad a la gente de recorrerlo y haga uso de sus instalaciones, ha hecho que el sentimiento de pertenencia vuelva y continúe fluyendo en el CHCM. Con base a un análisis de algunos edificios que más adelante se presentan y de un espacio en específico como lo es la azotea, se buscará una propuesta novedosa dentro de los sistemas ligeros, que se adapte, funcione y denote a este género tan especial de construcciones.



- Plano del Centro Histórico de la Ciudad de México, en color naranja se observa el denominado primer cuadro de la ciudad y en amarillo, la zona de amortiguamiento -

## 2. Objetivos

El presente trabajo propone una cubierta ligera para el uso de una azotea dentro de un edificio antiguo.

El caso de estudio se encuentra dentro del perímetro A del centro histórico, en la calle de Guatemala. El inmueble con el N°23 ya se encontraba abandonado y con gran deterioro evidente, y fue adquirido por una empresa privada para ser salvado. Los dueños tienen la idea de poner aquí una chocolatería, así como de utilizar cada espacio existente en el predio. Así pues además de ser una tienda chocolatera, desean abrir un museo pues debajo de este edificio antiguo yacen los vestigios del Huei Tzompantli del Templo Mayor, lo cual garantiza una gran cantidad de visitantes. De igual manera, es acertado pensar que la azotea de este edificio puede ser rehabilitada para ser usada como restaurante, cafetería, mirador o sala de exhibición y con ello la intención para cubrir esta área.

A través de una observación de análogos y un análisis de transmisión de esfuerzos, se llegará a una búsqueda de la forma que sea óptima y eficiente para este proyecto, tratando de llevar al mínimo aspectos como son el peso de la estructura, el tiempo de ejecución y el precio de los materiales a utilizar.

## 3. Antecedentes

Dentro de la zona conocida como “El primer cuadro” del Centro Histórico de la Ciudad de México, se encuentran varios inmuebles que sirven como análogos para este trabajo; todos ellos ubicados en edificios restaurados en los que se logró aprovechar la altura de la construcción para hacer de la azotea un espacio a ser utilizado por el usuario. Aquí presento tres casos y su análisis.

### 3.1 Análogos

-Centro Cultural España-



- Localización del Centro Cultural España, para este caso en particular se aprovechó su vista hacia la parte trasera de la Catedral Metropolitana -

Ubicación: Donceles 97, Colonia Centro.

Tipo de Proyecto: Espacio cultural y educativo

Área construida: 3700 m<sup>2</sup>

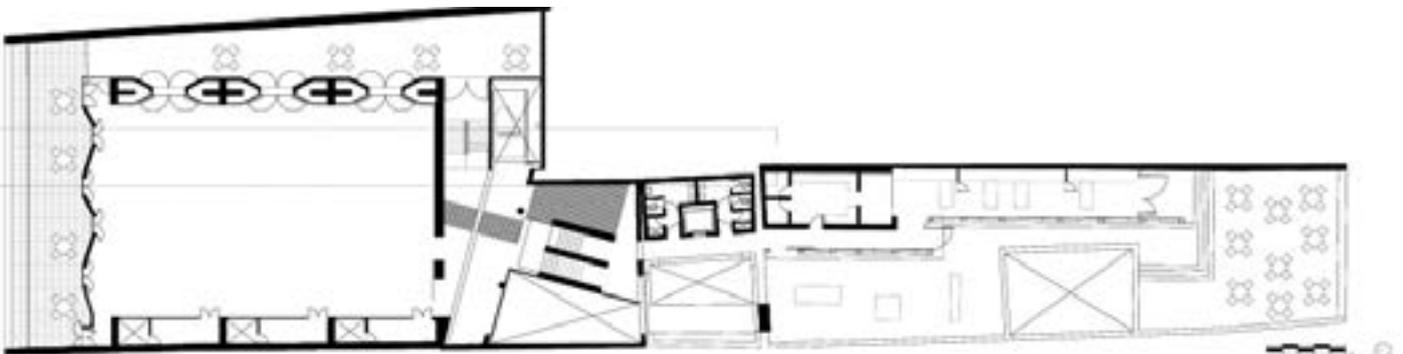
Área de terraza: 100 m<sup>2</sup>

Materiales: Acero estructural, vidrio templado, lona de PVC

Localizado en pleno corazón del Centro Histórico, a espaldas de la Catedral Metropolitana se rehabilito el inmueble, que data del siglo XVI para convertirse en el CCEMx. El edificio cuenta con un auditorio, salas de exposición y talleres, así como de un restaurante ubicado en su último piso. La Terraza, nombre con el que se conoce a este restaurante, se encuentra al aire libre y se ofrecen desde conciertos, presentaciones o eventos sociales nocturnos. Apoyándose de la gran vista que beneficia a este lugar, este espacio colabora para reavivar y preservar la zona en movimiento.

Para cubrir este espacio se planteó una estructura a base de marcos metálicos que sostienen unas placas de vidrio y así tener iluminación natural, esta estructura cuenta con un mecanismo móvil permitiendo su apertura, total o parcial, conforme las necesidades que se requieran para los eventos que se presentan.

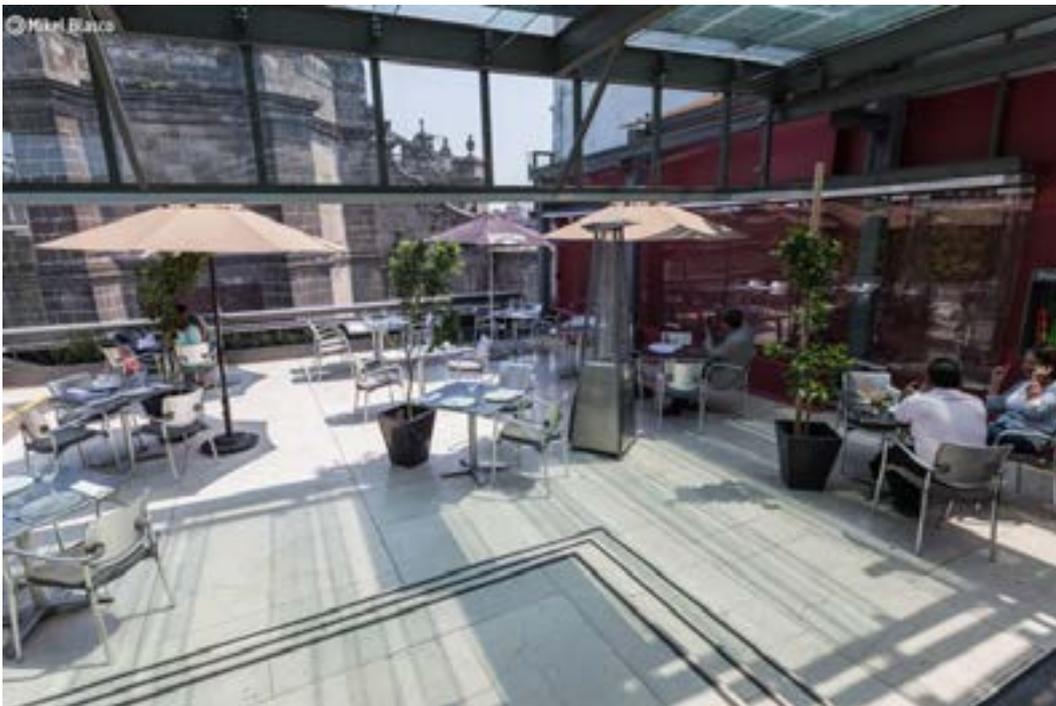
En la terraza se detecta, que la circulación del aire no es la óptima pues a cierta hora del día, bajo los rayos directos del sol, se concentra demasiado el calor en el sitio. Prueba de esto es que se recurrió a revestir la cubierta de vidrio con una membrana para evitar el paso directo de la luz, así como el uso de varios ventiladores para refrescar el recinto. Al contar con dos colindancias laterales, la única entrada y salida de aire es por la parte sur, justo donde se tiene una vista panorámica detrás de la catedral; y es donde se produce un cuello de botella para la circulación del aire y el calor entorpece el disfrutar la estancia a plena tarde.



- Planta del sitio, donde se puede observar el confinamiento de la terraza por los laterales (oriente y poniente), dejando una gran abertura hacia el sur lo cual brinda las vistas hacia la Catedral -



- Corte del sitio, donde se pueden ver las diferentes alturas, tanto de la terraza, como de la Catedral y el edificio contiguo del CCEMx, estas diferencias de nivel no permiten la circulación del aire en la terraza y si se incluye la cubierta de cristal, el efecto invernadero se presenta haciendo de este espacio un horno -



- En la foto superior se aprecia el espacio interior de la terraza y la estructura metálica de la cubierta -



- Foto a detalle del interior de la terraza donde se puede observar la virtud de sus vistas, así como la necesidad de usar sombrillas y ventiladores para disipar el calor -

Dadas las condiciones del lugar, por las colindancias existentes, fue un gran acierto el mandar los apoyos de la cubierta hacia los laterales para crear marcos, que si bien este proyecto se observa moderno, a mi parecer se utilizó el cristal para dar contraste con el acero y no encerrar el espacio, con lo cual se aprovecharon las vistas pero se sacrificó el confort de la terraza.

## -Edificio la Esmeralda-



- Entre la calle Isabel la Católica y el andador peatonal de Madero, se encuentra este edificio -

Ubicación: Isabel la Católica 2, Colonia Centro

Tipo de Proyecto: Museo

Área construida 354 m<sup>2</sup>

Área de Terraza: 112 m<sup>2</sup> aprox.

Materiales: Acero estructural, losa de concreto y cortinas

Este edificio data de finales del siglo XIX y en él se encontraba una de las más lujosas joyerías del país. El edificio inaugurado por el Presidente Porfirio Díaz sufrió de varios cambios en cuanto a su uso, albergando oficinas de gobierno, bancarias y hasta discotecas o centros nocturnos.

Con todos los cambios ocurridos dentro del centro histórico de la ciudad México, este edificio fue restaurado por el Arq. Gabriel Méridgo Basurto, a fin de adecuar sus espacios para los requerimientos de lo que hoy conocemos como el Museo del Estanquillo. El proyecto museístico contempló tres salas de exhibición, una sala de lectura con más de 2 mil libros y una terraza con cafetería en la que también se realizan presentaciones editoriales y culturales.



- En la foto se aprecia el lugar en su normalidad, las columnas y cubierta, así como la vista hacia la Iglesia de la Profesa -



- Parte del pasillo a descubierto en el que se aprovechan al máximo las vistas que el sitio ofrece -

Desde la terraza de este lugar se brinda una vista hacia los edificios aledaños, en especial hacia la Iglesia de la Profesa; La cubierta propuesta es un pórtico sencillo a base de columnas de acero tubulares y el uso de losa cero para la techumbre. Si bien, aquí la cubierta cumple su función, se puede notar que no se consideró toda el área de la terraza, dejando un pasillo perimetral a lo largo y ancho al descubierto. Si se hubiese cubierto toda el área, las columnas de la cubierta habrían quedado sobre el perímetro y obstruirían las vistas, esto si sucede, sin embargo, la solución del pasillo ofrece la opción de disfrutar el lugar permaneciendo a la intemperie.

Como se puede apreciar, la intervención de este proyecto es mínima, con un impacto reducido, dada la cercanía de los inmuebles que ahí se encuentran. Se propuso una solución asequible, sin glamour o tecnología y se consiguió un excelente espacio a cubierto.

## -Restaurante "El Mayor"-



- En la esquina entre la calle de República de Argentina y Justo Sierra, se encuentra este inmueble con una ubicación privilegiada-

Ubicación: República de Argentina 17, Colonia Centro

Tipo de Proyecto: Comercio y gastronómico

Área Construida: N/D

Área de Terraza: 168 m<sup>2</sup> aprox.

Materiales: Acero estructural, vidrio templado, granito, madera, lona de PVC

Detrás de los vestigios aztecas de la gran Tenochtitlan se encuentra un edificio, propiedad de la Editorial Porrúa. Este predio que data de 1521 fue casa del regidor Luis de Castilla en el siglo XVI y desde 1910 paso a ser propiedad de Los Porrúa, quienes adaptaron el inmueble para que fuera una librería.

En el marco de la celebración de sus 105 años, la librería Porrúa modernizó sus instalaciones y este edificio en particular fue restaurado, conservando intactas sus fachadas ya que están catalogadas por el INAH, pero cambiando todo su interior. La Intervención, fruto del arquitecto Alberto Kalach, contempla la expansión de los niveles inferiores del edificio para expandir el catálogo de libros, así como la creación de una terraza en la azotea para albergar un restaurante.

Este espacio exterior cuenta con una cubierta principal, a base de marcos metálicos para sostener placas de vidrio templado que hacen de techumbre. Se hizo uso de lonas de pvc móviles como una segunda piel por debajo del cristal para evitar efectos como el paso de la luz directa y el calor. Aquí entra en juego el diseño de todo el espacio, ya que se construyó un desnivel en el perímetro para que no se entorpecieran las vistas entre los comensales. Se utilizaron acabados como la madera y se aprovechó el gran paisaje hacia el Templo Mayor.



- Foto al interior del restaurante El Mayor, se observa el desnivel para los comensales y la estructura para la cubierta -



- A partir de cierta hora es necesario el recorrer los telones de la cubierta para crear sombra y no suba demasiado el calor al interior -

En este restaurante se presenta la misma situación que en la terraza del CCEMx, siendo necesario colocar una membrana debajo de la cubierta de cristal para proteger del sol, aunque aquí no fue necesario el uso de ventiladores gracias a las dimensiones con las que cuenta la terraza y que no hay edificios aledaños que impidan el paso de las corrientes de aire, logrando que el lugar sea conserve fresco.

Podemos deducir y observar en estos proyectos, que el gran punto a resaltar fue su ubicación y las vistas, a partir de estos se desarrollaron las cubiertas tratando de aprovechar al máximo los metros cuadrados disponibles. El diseño estético de la misma no cobra relevancia y pasa desapercibido, siendo de mayor importancia el espacio cubierto y su interacción con el contexto.

Todas ellas cumplen con su función y ofrecen en mayor o menor medida el confort necesario para hacer de una azotea un lugar interesante y habitable, así pues de esto se obtienen algunas incógnitas vertidas en la hipótesis de este trabajo.

## 3.2. Hipótesis

Bajo los análogos presentados queda claro que la solución dada para las cubiertas parte de su sencillez. El marco rígido es un sistema probado que funciona aunque se sacrifican ciertos aspectos como, el peso, el costo y la visibilidad.

Como ya hemos visto, la materia prima de estos espacios son las visuales que se pueden ofrecer y entran en juego aspectos como los apoyos, materiales y dimensiones para la cubierta; Tomando esto como punto de partida, la propuesta que se dé deberá de buscar el mínimo número de apoyos consiguiendo el máximo claro a cubrir, esto sin dejar de lado la estabilidad del sistema, la factibilidad y añadiendo el valor estético de la misma.

El reto puede parecer complejo, pero si se examina con detenimiento los aspectos claves sobre estas cubiertas, se puede encontrar un sistema estructural que se adapte de la mejor manera y de solución a los requerimientos anteriores.

## 4. Planteamiento de Diseño

La cubierta a plantearse estará sobre un edificio antiguo a restaurar, el cual está ubicado en la calle de Guatemala, en la colonia Centro detrás de la Catedral Metropolitana. El terreno sobre el que se desplanta esta construcción tiene unas dimensiones de 12 metros de frente por 40 metros de fondo aproximadamente, el edificio de 2 niveles se encuentra en un proceso de estudio y rehabilitación.

Los terrenos de esta zona del Centro Histórico datan de tiempos de la conquista, siendo predios que fueron asignados a miembros del ejército o milicia ya que por su gran cercanía a los asentamientos aztecas, eran vitales para mantener el control del lugar. Si bien los terrenos se han conservado íntegros, manteniendo las mismas dimensiones entre uno y otro, las construcciones no gozan de ese lujo pues han sufrido el deterioro o modificaciones producto del paso de distintos dueños, así como del tiempo.

El edificio en cuestión albergaba diferentes usos, en su planta baja contiene espacios que fueron utilizados como locales comerciales y sobre los pisos superiores se le dio un uso habitacional, rentando cada cuarto, por lo que cada espacio fue intervenido de manera distinta. Aquí es donde se observa el mayor daño estructural de esta construcción pues se pueden ver losas abiertas, muros partidos y severas inclinaciones, fruto de los hundimientos diferenciales que se dan en esta zona de la ciudad.



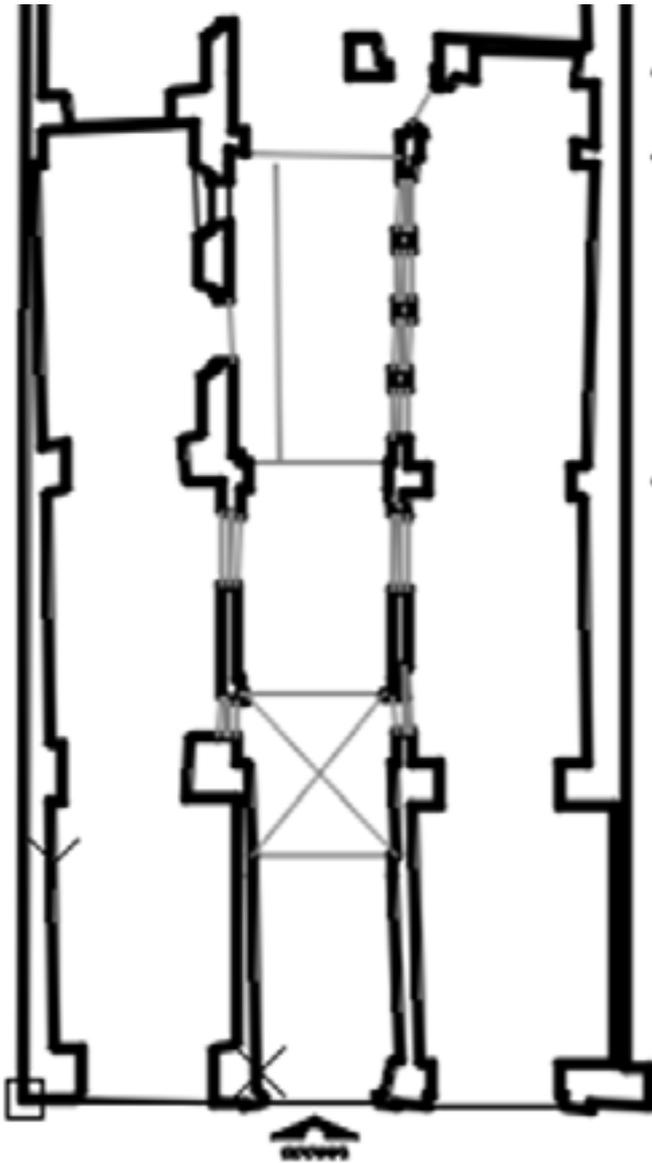
-Se puede observar que la fachada no presenta grandes daños como en su interior-



-Foto de uno de los pisos superiores al interior del inmueble, en él se observa el grado de deterioro en el que se encuentra -

Como existe un gran daño en los pisos superiores, estos no pueden tomarse en cuenta para la propuesta, así que el punto de partida será sobre la planta baja ya que se encuentra en mejor estado y sobre la cual se infiere que no habrá algún cambio drástico de manera estructural.

Aun cuando en los niveles superiores, se realice alguna modificación en el sistema constructivo cualquiera que sea la estructura que se proponga, esta deberá de respetar el flujo ya establecido sobre la construcción antigua, tratando de encontrar aquellos puntos sobre los cuales la transmisión de las cargas sea la más eficiente.



-Planta baja del edificio localizado en la calle de Guatemala 24, se pueden ver las dimensiones alargadas del predio, así como las modificaciones que se realizó para convertir sus espacios en locales comerciales-

Como se puede apreciar en la planta del inmueble, los muros anchos son característica del sistema constructivo de su época, haciendo uso únicamente de la mampostería como soporte. Siguiendo esta referencia, más adelante se presenta un análisis para determinar los posibles puntos de anclaje para la cubierta.

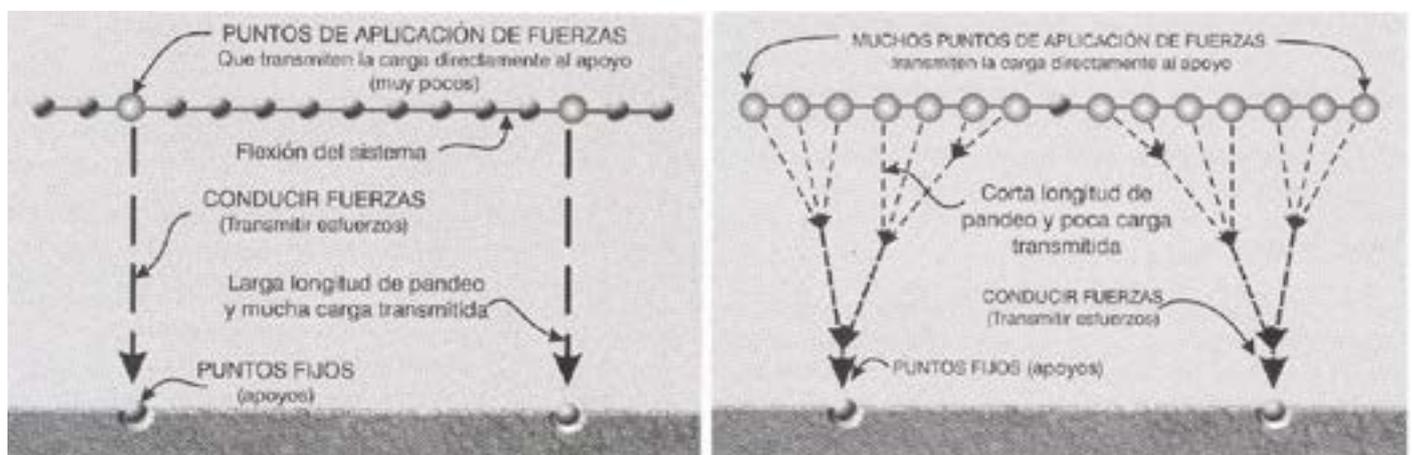
## 4.1 Preparación.

En la búsqueda de un sistema estructural liviano y eficiente, sabiendo que la mejor forma en que se puede hacer trabajar a una estructura es bajo esfuerzos axiales, la propuesta para cubierta deberá de alejarse de la flexión. Para lograr esto, será necesario reducir la cantidad de material y hacer uso de una transmisión de cargas hacia los puntos de apoyo de la manera más fluida posible.

Frei Otto, arquitecto de origen alemán y ganador del premio Pritzker 2015, planteo una aproximación a este tipo de problema.

*“La cubierta puede considerarse como una superficie formada por muchos puntos de aplicación de fuerzas, que deben conducirse hasta unos puntos fijos (apoyos) “*

Dentro de un sistema estructural en el cual el número de aplicación de fuerzas es muy reducido, este se verá sometido a esfuerzos de flexión este esfuerzo será menor o mayor conforme la distancia entre los puntos de aplicación varié. Podríamos inferir que, si consideramos un número mayor de puntos de aplicación de las fueras, nuestro sistema como tal no se verá afectado por la flexión.



-Comparación de esquemas entre un sistema con pocos puntos y otro con muchos puntos de aplicación de las fuerzas-

En la actualidad, el sistema que puede ofrecer un número infinito de puntos de aplicación de fuerzas son las estructuras neumáticas, pero cuentan con la limitante de estar conectadas a un equipo que suministre el aire necesario para conseguir una presión constante, por lo que esta idea en si descarta este sistema para la propuesta.

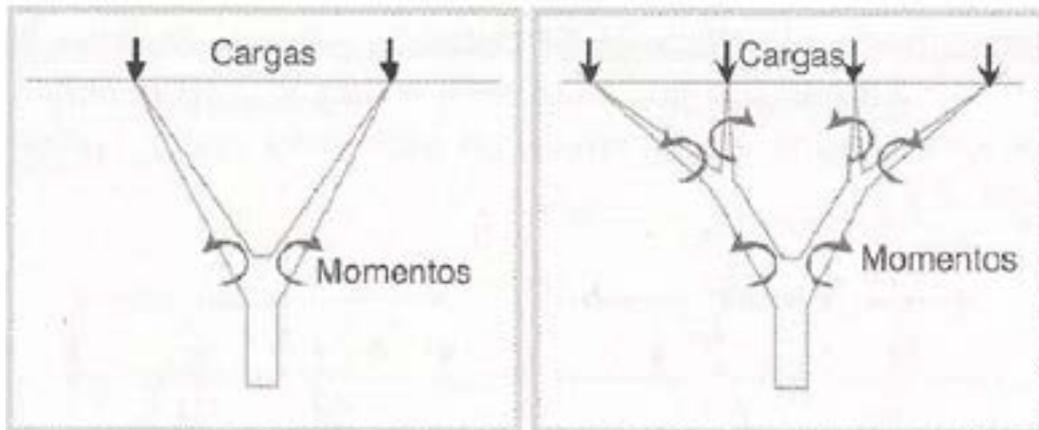
Bajo esta exploración, los sistemas ramificados ofrecen una cantidad considerable de puntos de aplicación de fuerzas, estos sistemas también conocidos como “arbóreos” derivan de su gran parecido visual al de un árbol. Las estructuras arbóreas también pueden ser consideradas como estructuras de barras y nodos y por lo tanto podríamos dividir las en dos grupos para comprenderlas mejor.

- Con nodos empotrados
- Con nodos articulados

## 4.2. Estructuras Arbóreas con Nodos Empotrados

Cuando la estructuras y las ramificaciones de esta se conciben con nodos empotrados, los momentos a generarse se irán transmitiendo a partir de cada elemento hacia los niveles inferiores. De tal forma que entre más ramificaciones se hagan a la estructura los esfuerzos de flexión tenderán a aumentar pues se van acumulando y en el elemento de apoyo fijo se concentrara el momento mayor, haciendo que ahí se presenten las deformaciones máximas.

Siendo que cada ramificación de esta estructura esta empotrada, aquí la cubierta no trabaja en conjunto y se puede considerar como otra estructura distinta.

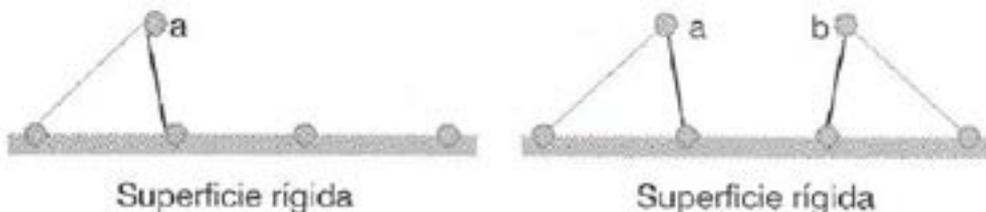


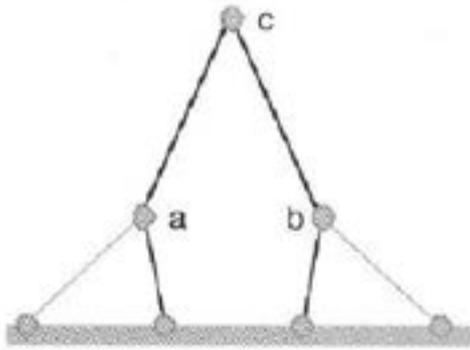
-Forma de trabajo de una estructura arbórea con nodos empotrados en donde se observan los momentos generados bajo cargas verticales-

## 4.3. Estructuras Arbóreas con Nodos Articulados

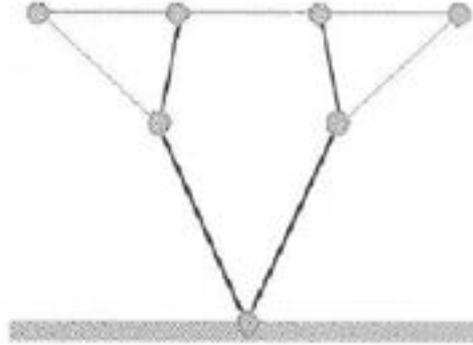
A diferencia de las ramificaciones empotradas, para este tipo de estructuras articuladas es vital que el sistema ramificado trabaje en conjunto con la cubierta. Considérese una superficie rígida sobre la cual se pueden conectar dos barras formando un triángulo, este se rigidizará incluyendo el vértice que se forma fuera de la superficie inicial.

Si dentro de la misma superficie rígida se repite el proceso anterior, se genera otro nuevo punto estable; Si se repite de nueva cuenta el proceso, pero ahora partiendo sobre los puntos generados con anterioridad y se conectan otras dos barras, se creará un nuevo triángulo a partir de dos puntos estables y un nuevo vértice estable. Se podría pues, repetir varias veces este procedimiento y la estructura generada se consideraría estable.





Superficie rígida



-Esquema que muestra cómo se va construyendo una estructura arbórea a la hora de considerar nodos articulados-

En este caso, ya que la estructura se encuentra articulada los esfuerzos ante las cargas verticales serán axiales y dependiendo de las longitudes y disposición de las barras podrán presentar esfuerzos de flexión.

De esto se obtienen algunas conclusiones. Como se planteó desde un inicio y bajo el esquema del sitio donde se emplazara este proyecto, la idea de considerar a la cubierta como una estructura empotrada no sería la adecuada, pues hemos visto que al final dentro de sus apoyos se concentrara el momento máximo, lo cual representa una cantidad mayor de material, así como una transmisión de cargas mayores a un edificio que puede presentar problemas bajo este tipo de estructuras por su carácter de antiguo.

Las estructuras arbóreas articuladas representan una mejor opción al problema planteado ya que su transmisión de esfuerzos axiales no representa un riesgo para este tipo de construcciones; Sin embargo, en este punto, se deben considerar otros factores, para lograr la estabilidad de toda la estructura, el diseño de la cubierta y su rigidez son esenciales, así como el desarrollo geométrico y espacial de las ramificaciones, pues son dos partes que trabajan en conjunto y no se puede abordar uno sin tener presente al otro.

***“Antes y por encima de todo cálculo está la idea, moldeadora del material en forma resistente, para cumplir su misión.”***

Eduardo Torroja Miret

## 5. Geometrización

Al igual que en cualquier otro proyecto, hay distintas formas de llegar a una primera idea, en el caso de las estructuras arbóreas los modelos físicos, maquetas de hilos o cuerdas mojadas fueron suficientemente estudiadas dentro del Instituto de Estructuras Ligeras en Stuttgart, Alemania desde 1992.

También existen programas computacionales que sirven como herramientas para concebir modelos digitales y tridimensionales, estos ofrecen la ventaja de poder ser manipulados infinidad de veces hasta encontrar la mejor disposición de sus elementos, haciendo uso de la parametrización y que con los distintos avances tecnológicos ya se puede incluir en estos modelos la interacción con fuerzas físicas (gravedad, viento, etc.).

Previo a esto, se debe partir de la definición de los dos sistemas estructurales que se emplearan para el diseño de la estructura, con el objetivo de lograr su comprensión y conseguir un correcto uso de sus componentes y así llegar a una búsqueda de la forma más efectiva.

### 5.1. Cascarones Reticulados

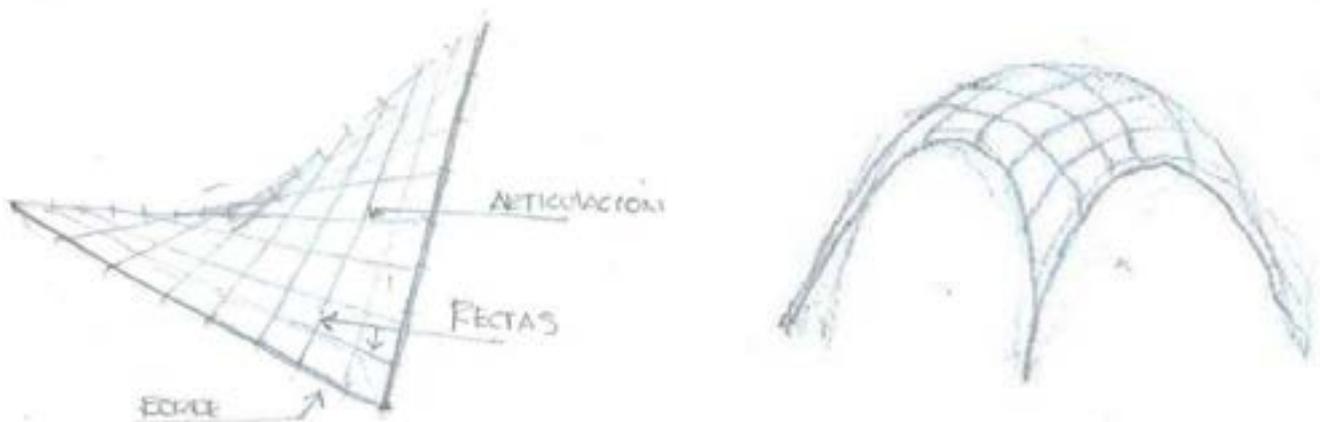
Material: acero, madera, cables, cartón.

Peso: Ligero, espesor mínimo.

Comportamiento: presenta un trabajo a compresión o tracción (axial), la rigidez se logra a través de su curvatura a la vez que permite utilizar elementos rectos para su construcción.

Geometría: Curvatura simple o doble, retícula ortogonal que permite la modulación de las barras.

Ventaja: al ser reticulado, no se utiliza tanto material para su superficie, dejando huecos que lo hacen más ligero en comparación a un cascaron normal, también se aprovechan los vanos para el paso de luz directa.



-Superficies reticuladas de curvatura simple o doble que pueden modularse según las necesidades-

## 5.2. Estructura Arbórea

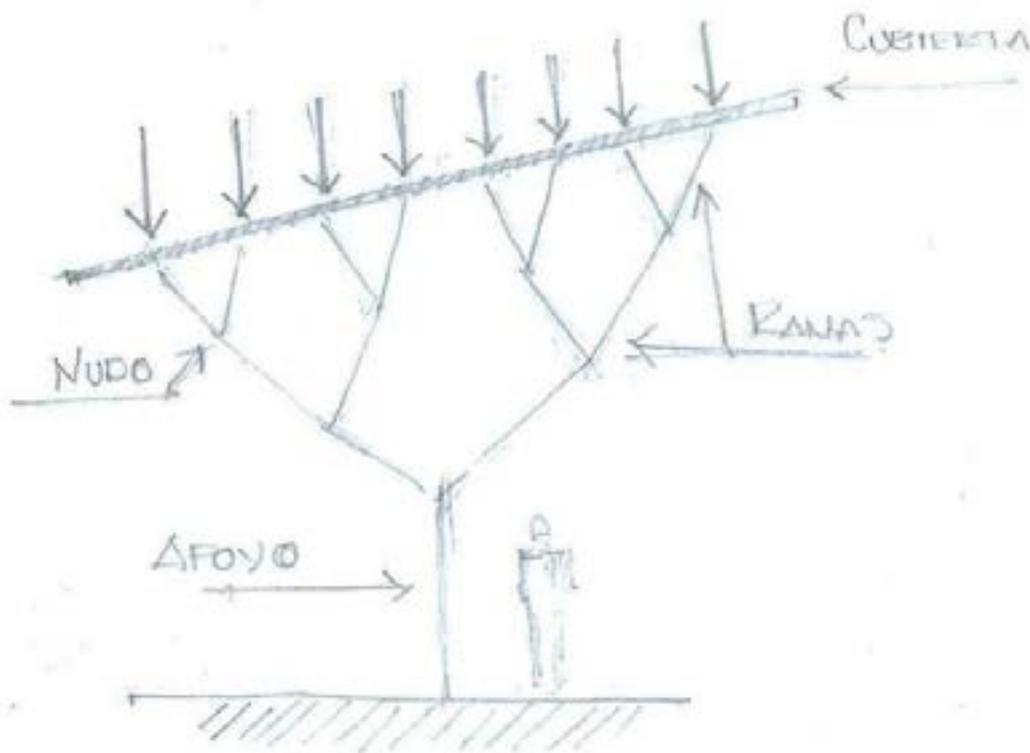
Material: acero, madera y cualquier otro material que resista de igual manera los esfuerzos a tracción y compresión.

Peso: pueden ser consideradas dentro de los sistemas ligeros gracias a sus características de ramificaciones, lo que distribuye los esfuerzos en más elementos y por ende se utilizan secciones menores.

Comportamiento: su trabajo principal es a compresión o tracción y es posible que tomen flexión dependiendo de su diseño. Transmite cargas verticales derivándolas entre sus componentes y concentrándolas en un solo punto fijo.

Dimensiones: son consideradas en general para claros grandes, así como para espacios altos y angostos.

Geometría: ramificaciones de sus elementos portantes por medio de triangulaciones.

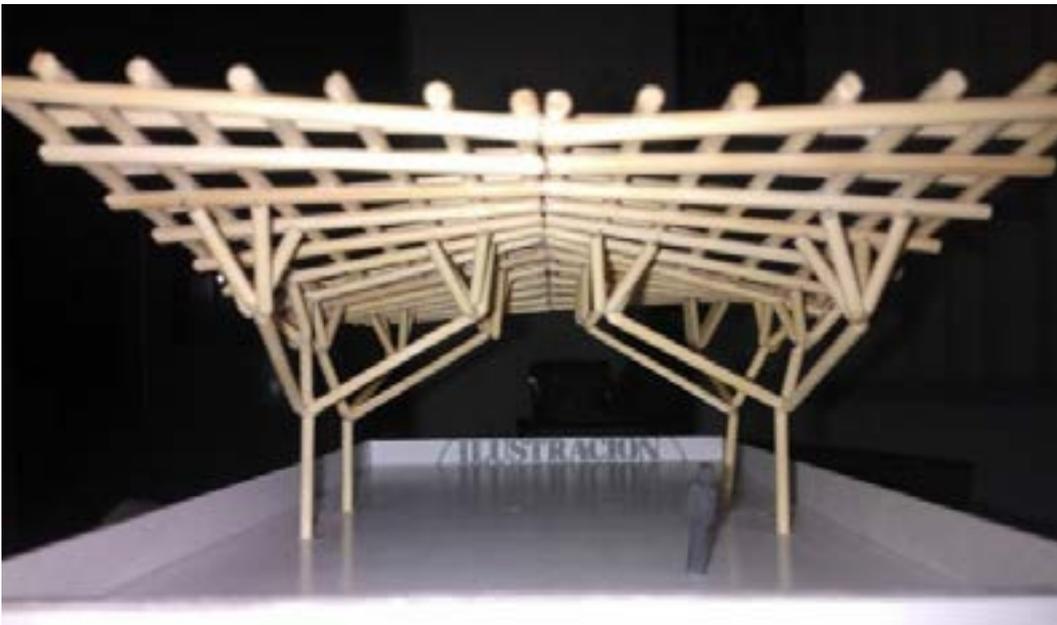


-Croquis explicativo de los elementos de una estructura arbórea-

## 5.3. Búsqueda de la Forma

Para este caso en particular, el primer acercamiento que se tuvo hacia el diseño de la estructura fue por medio de una maqueta sencilla a escala (1:75). Se utilizaron palos de madera y pegamento por la facilidad en su uso y de forma arbitraria se seleccionaron los puntos de transmisión de las fuerzas sobre la cubierta, de igual manera se decidieron las diferentes alturas para hacer las ramificaciones y el punto de apoyo.

De este primer experimento de realizar la maqueta se obtuvo información relevante, como el hecho de que al no tomar en cuenta ninguna restricción del edificio para los puntos de apoyo, en este caso en particular, se tomaron 4 puntos de apoyo cercanos a los bordes y al proponer una altura de 2 metros para estas barras, las ramificaciones del siguiente nivel dieron ángulos muy agudos y por ende barras muy largas, lo cual ocasionaría problemas por pandeo y flexión.



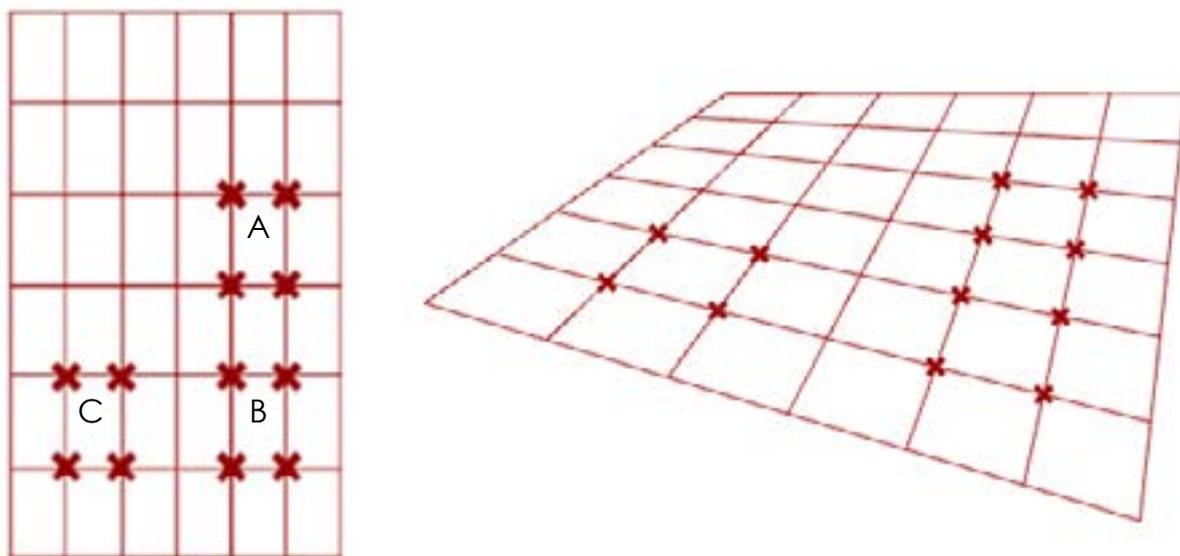
-Foto de la primera maqueta, hecha a base de palitos de madera y pegamento -

Esta maqueta aportó ideas sobre cómo podría ser la construcción de una estructura de este tipo a escala real y las dificultades que se podrían presentar, pues al comienzo se tomó la decisión de que la estructura, al igual que un árbol debía de iniciarse por su tronco o apoyo y esto trajo consigo una serie de problemas para poder pegar las barras siguientes por sus posiciones y alturas requeridas en el espacio, así pues se cambió el método y se empezó la maqueta como ya vimos por la cubierta. Con esto se comprobó que el paraboloides hiperbólico de bordes rectos se transformó en la superficie que rigidiza cada una de las barras que se iban conectando.

Al terminar toda la estructura, se observó que se presenta un trabajo en conjunto como un sistema en voladizo, pues con los puntos de apoyo situados fuera del centro de gravedad hacían que la cubierta tendiera al giro. Fue necesario una unión en espejo para que en conjunto las cubiertas se contrarrestaran y se equilibraran, cosa que, si se mantiene el diseño en simetría se consigue.

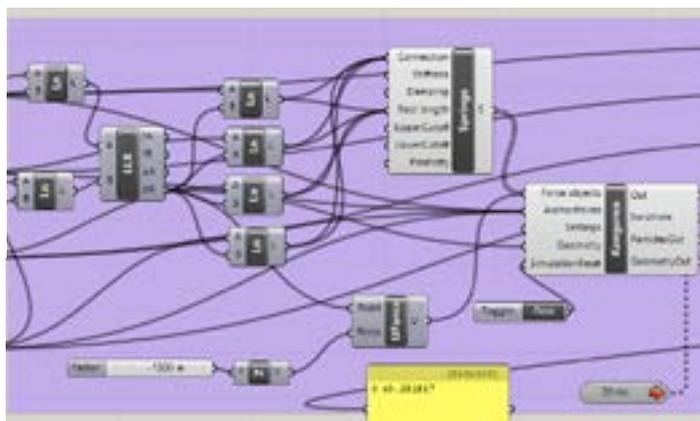
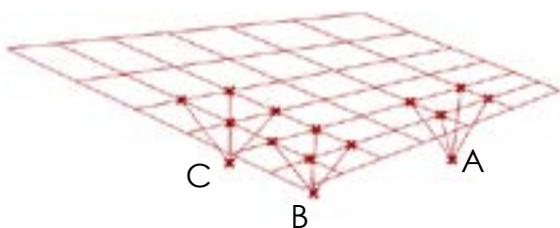
Después de realizar esta maqueta junto con la información obtenida se procedió a elaborar un modelo digital para poder comparar las dos formas de hacer una estructura arbórea. Para esto se utilizó un software especializado llamado Grasshopper el cual es un plug-in que se ejecuta dentro de la plataforma del programa Rhinoceros 3D para el modelado tridimensional y que permite hacer uso de parámetros mediante la programación de definiciones que puedan ser usadas, adaptadas y mejoradas ininidad de veces hasta obtener el resultado más óptimo para el diseñador. De igual modo se utilizó Kangaroo, otro plug-in que simula fuerzas físicas para observar cómo sería el proceso de búsqueda de la forma en este modelo bajo las cargas gravitacionales.

El primer paso para iniciar la definición de la estructura arbórea fue determinar la geometría de la cubierta, la cual al igual que en la maqueta anterior se concibió como un paraboloides hiperbólico de bordes rectos con unas dimensiones de 6 metros de ancho por 10 de largo, la altura dada entre el punto más bajo y el más alto del paraboloides fue de 2.20 metros. Con esto establecido se hizo una superficie en el programa la cual se puede dividir en N número de partes por lado utilizando un componente dentro del programa llamado "SDivide" con el que se obtiene los puntos sobre los bordes del paraboloides entre cada segmento dividido, se probaron una serie de divisiones al azar y al final se optó por una división con 6 partes iguales por lado. Con los puntos sobre los bordes se trazaron rectas lo cual genero 49 puntos sobre la superficie fruto de la intersección de cada una de ellas.



-División del paraboloides y puntos de acción de las fuerzas-

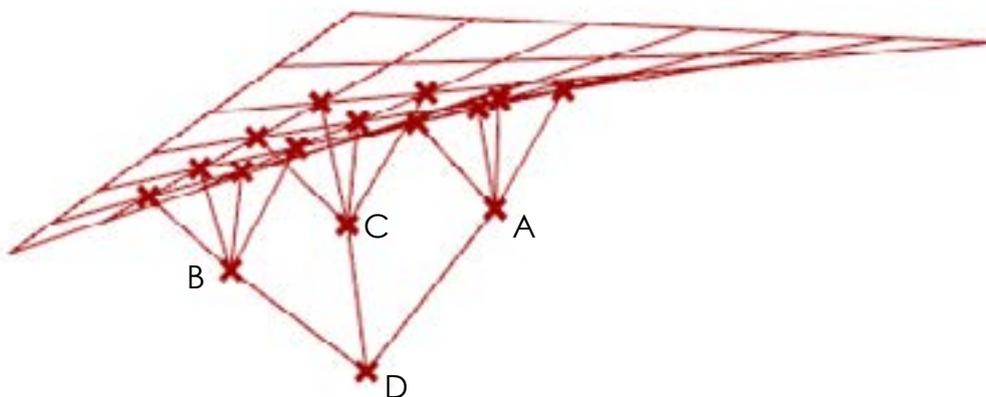
Partiendo de este paraboloides dividido y reticulado, se eligieron 12 puntos sobre la superficie de los cuales empezaría las ramificaciones. Al tener una serie de rectángulos no coplanares se utilizó un componente del programa, que resuelve intersecciones con lo cual se pudo obtener el punto medio de cada rectángulo, a este punto intermedio se le unieron cada una de las esquinas a la vez que se dotó con un vector asemejando la fuerza de gravedad, esto estiro todas las líneas hacia abajo y se logró formar un tetraedro haciendo así el primer nivel de las ramificaciones. Al anexar una serie de componentes más a definición dentro del programa se puede obtener de manera precisa mucha información, como la longitud de cada barra y el ángulo formado entre ellas; también es posible interactuar y modificar cada barra al ajustar los parámetros de sus dimensiones y así elegir la mejor posición de las mismas.



-Imagen donde se muestran los primeros tetraedros creados para las ramificaciones, así como la definición y los componentes utilizados dentro de la programación-

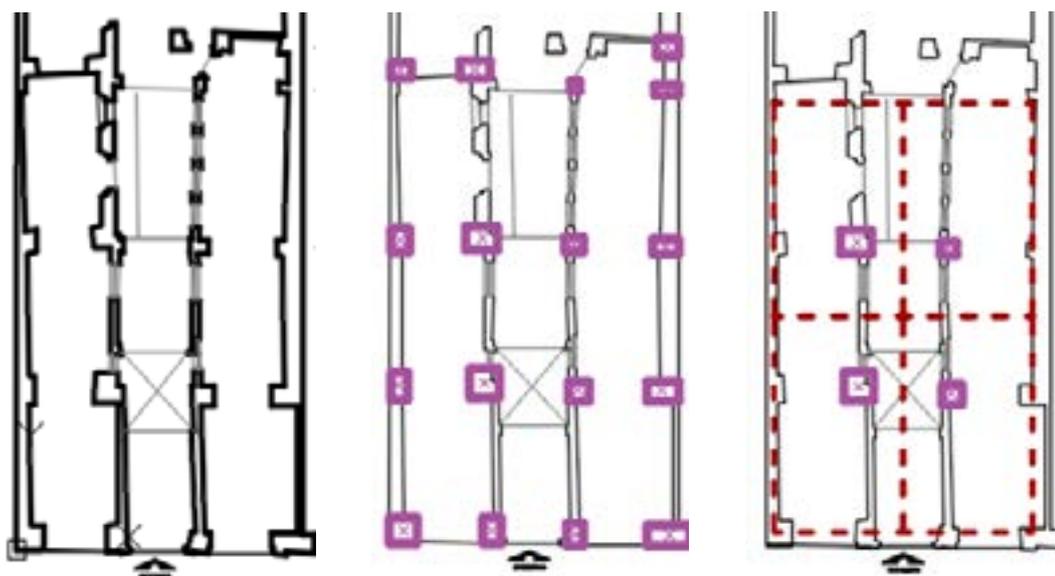
Para esta morfología dentro de la definición se obtuvieron longitudes para las primeras ramificaciones que varían entre 1.30 a 1.60 metros, con ángulos de 40° aproximadamente. Obteniendo el primer nivel y recordando la geometrización de las estructuras arbóreas articuladas, se pasó a conformar el segundo nivel, dado que la rigidez se mantiene y para hacerlo solo fue necesario repetir algunos pasos anteriores.

Para el segundo nivel de ramificaciones, las barras que se obtuvieron tienen una longitud que va del 1.80 a los 3.00 metros aproximadamente, este cambio tan amplio en las longitudes se debe a que la distancia entre los vértices "A, B y C" es mayor y se buscó que con el nuevo vértice obtenido "D", se lograra una buena altura para toda la estructura. En esta parte y gracias a la parametrización, la definición realizada permite que todo el sistema creado trabaje en conjunto, esto quiere decir que si en la programación se modifica la fuerza que actúa en el primer nivel de las ramificaciones esto afectará al siguiente nivel cambiando así la forma de toda la estructura arbórea.



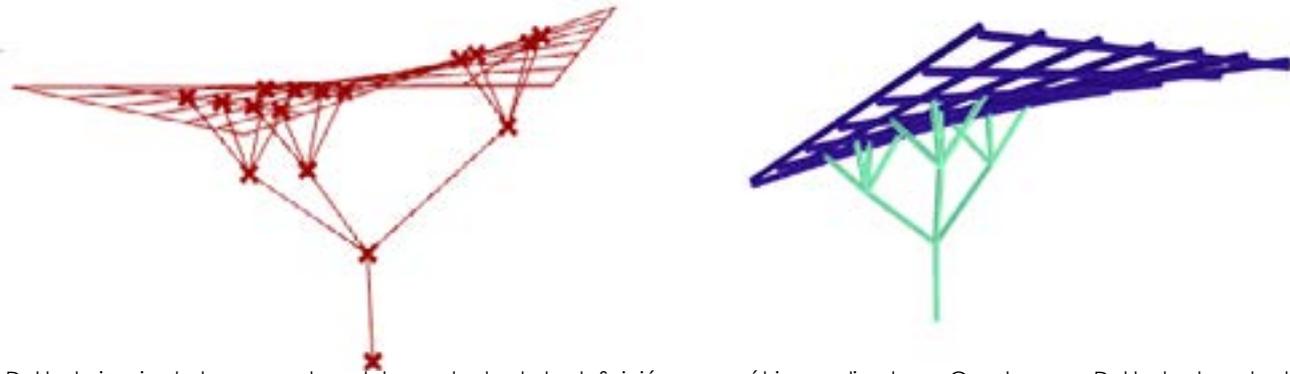
-Para el segundo nivel se crea otro tetraedro que de igual forma su vértice puede ser manipulado con una fuerza para obtener diferentes conformaciones -

Para la última parte de la estructura arbórea que sería el tronco, fue necesario tomar en cuenta la conformación de la planta del edificio en donde se emplazara la cubierta para poder observar y determinar el mejor lugar de apoyo.



-Planta baja del edificio localizado en la calle de Guatemala 24, en rosa aparecen los puntos estructurales de apoyo y en rojo la proyección de la cubierta. Se eligieron los 4 puntos centrales para no afectar las vistas hacia los costados y frente-

Teniendo los 4 puntos de apoyo localizados se puede terminar la estructura arbórea, pues al tener el vértice "D" del segundo nivel de ramificaciones, la última barra se obtiene producto de la unión de este punto con el del apoyo. A esta última barra no es necesario afectarla por alguna fuerza ya que la definición hace posible que cualquier cambio en los vértices obtenidos altere las dimensiones de estos y del tronco también, por lo que para este caso en específico la última barra de anclaje resultó en una longitud de 1.60 metros.



-Del lado izquierdo tenemos el modelo producto de la definición paramétrica realizada en Grasshopper. Del lado derecho tenemos el resultado del mismo modelo digital trabajado en Rhinoceros al cual se le ha agregado espesores para semejar tallos de bambú -

Después de concluir todo el modelo digital de la estructura arbórea, se buscó hacer una nueva maqueta más elaborada para comparar con base a lo obtenido en la computadora, los resultados y observar los aciertos y fallos de todo este proceso.

Este nuevo modelo físico se realizó a una escala más grande (1:25) para poder observar de mejor manera el comportamiento de toda la estructura, ya que uno de los objetivos que se buscó fue articular cada nodo del sistema.

Para la construcción del paraboloides se construyó un escantillón a modo de guía, capaz de recibir cada una de las barras rectas a colocar, en primer lugar las barras más largas (largueros) y encima de ellos las barras que cruzan transversalmente (travesaños). Para unir ambas barras en sus puntos de intersección, se elaboró un anillo metálico dispuesto en cada dirección y soldado al centro. Cada barra del paraboloides fue cortada a la medida que se obtuvo en el modelo digital y por lo cual no hubo ningún problema de desfase en el escantillón, así como de sobrantes o faltantes en las barras.

Posteriormente, al tener armado el paraboloides fue la construcción de las ramificaciones y para lo cual se unieron las barras que salían sobre los puntos identificados previamente en el modelo digital utilizando piezas de un paraguas para simular las articulaciones, de nueva cuenta y aprovechando el modelo digital se sacaron las medidas obtenidas para los niveles de ramificación y todas las barras unieron a la perfección. Al terminar los cuatro paraboloides y todas sus ramificaciones se procedió a montar la estructura sobre una base ya preparada con articulaciones para únicamente conectar los apoyos.



-En la foto del lado izquierdo se puede ver el escantillón que servía como plantilla para colocar los palitos de madera y del lado derecho se puede observar de cerca los anillos de alambre que conecta a la cubierta con la arbórea-



-vistas de la maqueta con la estructura completa montada-

Como se puede observar en ambas fotos inferiores, al montar la estructura sobre sus apoyos inmediatamente comenzaron a presentar deformaciones que modificaron el comportamiento de todo el sistema, esto producto de la poca rigidez de la estructura ya que el paraboloides diseñado no contaba con la curvatura suficiente y los nodos elaborados no garantizaron el agarre necesario.

Otro factor a considerar fue que para esta nueva propuesta, tanto el modelo digital y en el físico no se tomó en cuenta el trabajo estructural de paraboloides, esto quiere decir que, los puntos de acción o de apoyo que se eligieron para desarrollar la estructura arbórea estaban dentro de la superficie del paraboloides siendo que, deberían de partir sobre los bordes ya que es ahí donde se encuentran los esfuerzos.

Como conclusiones para esta etapa se pueden reafirmar ciertos puntos que era importante poner a prueba y observar para poder avanzar con el proyecto, estos son:

- La rigidez de la cubierta es absolutamente necesaria para el trabajo en conjunto con la estructura arbórea a fin de evitar deformaciones innecesarias dentro del sistema.
- En el caso de un paraboloides de bordes rectos para la cubierta, este debe de contar con cierta curvatura que cumpla con una "Constante de alabamiento" ( $k$ ), que será superior a 0.06, por lo que es necesario trabajar en su geometría analítica.
- Una estructura con superficie plana, suele apoyarse en la zona central, pero esta al ser una estructura resistente por forma, se debe de apoyar en la zona perimetral. Por lo que para este proyecto planteado, de un paraboloides arbóreo la clave de todo el sistema reside en los bordes, puesto que, de ahí es de donde se deben de tomar los esfuerzos que serán transmitidos por las ramificaciones.

## 6. Anteproyecto

Con toda la información recabada, y de modo experimental y analítico, es posible empezar con un planteamiento válido para dar forma a este proyecto, el cual se puede desarrollar en dos partes.

### 6.1. Paraboloide

Para la cubierta, el uso del paraboloide de bordes rectos permite una infinidad de aplicaciones ya antes exploradas por el Arq. Félix Candela con varios de sus cascarones. De las diversas configuraciones que pueden existir para el paraboloide, la que se empleará en este proyecto en específico será la del Paraguas, superficie que se genera al unir 4 paraboloides de bordes rectos y que por sus características hace honor a su nombre permitiendo tener un espacio cubierto de grandes dimensiones con un solo apoyo al centro.

Acorde a la configuración de la planta del edificio de este proyecto, se vuelve absolutamente necesario el transferir el peso de la cubierta de la manera más directa a los apoyos estructurales ya identificados. Por consiguiente, es poco probable tener un solo paraguas para cubrir en su totalidad a la azotea, por lo que para este proyecto se conformará una cubierta compuesta de 4 paraguas, lo que dará un total de 16 paraboloides. La simetría de esta cubierta y de cada uno de los paraguas ayudará en el equilibrio de todo el sistema, en ahorro de tiempo y ejecución pues la solución encontrada para uno de ellos será aplicable a los demás.

Las dimensiones óptimas para empezar el desarrollo del paraboloide que conformará a uno de los paraguas son de 3 metros de frente por 5 metros de largo. Como ya se había puntualizado en el capítulo anterior, el paraboloide de bordes rectos debe de cumplir con una constante (k), esto para garantizar la curvatura. Partiendo de esta condición tenemos:

Ecuación para encontrar los puntos sobre la superficie de un paraboloide hiperbólico

$$Z = kYX$$

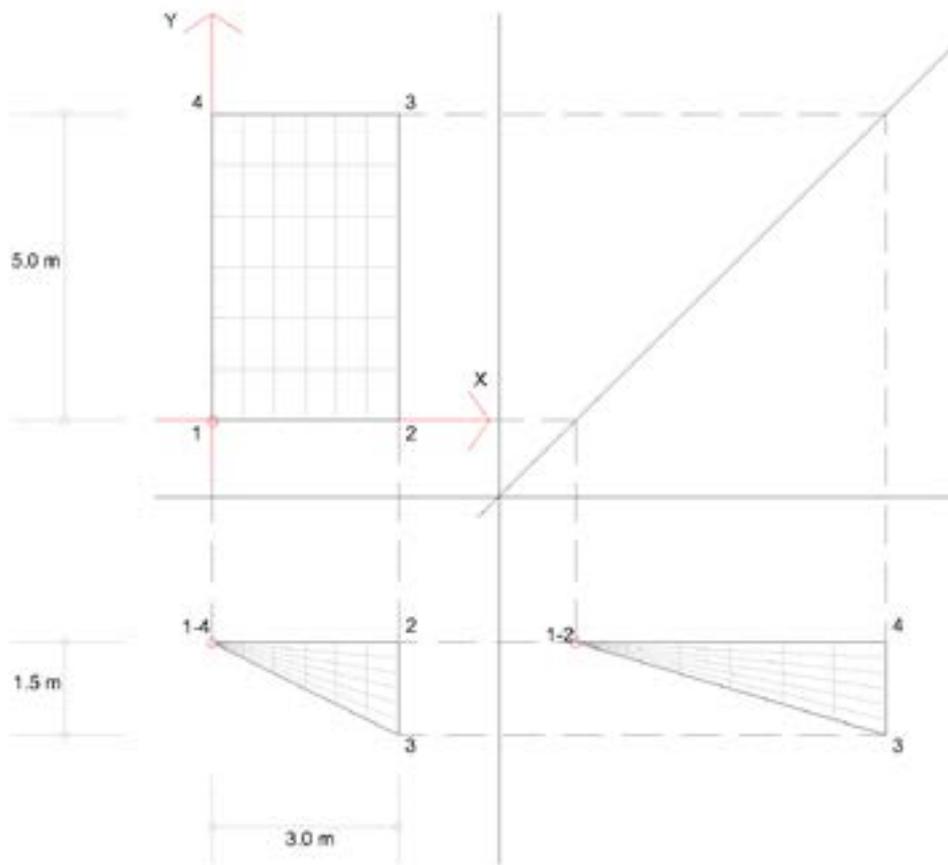
$$Z = (0.06) * (5) * (3)$$

$$Z = 0.9 \text{ m}$$

Encontrando Z se empezó a explorar la forma que tendría el paraboloide de bordes rectos, sabiendo que la altura entre el punto más bajo y el más alto no debe de ser menor a 0.90 metros esto para poder garantizar la rigidez a través de su curvatura. Esto condujo a una propuesta más estética y viable porque encaja para el desarrollo de la estructura arbórea. Para este nuevo paraboloide de bordes rectos se dieron las siguientes dimensiones.

$$X = 3.0 \text{ m} \quad Y = 5.0 \text{ m} \quad Z = 1.5 \text{ m}$$

Con estos parámetros se puede hacer todo el desarrollo matemático y geométrico para la cubierta, como se presente a continuación.



-Montea del paraboloide hiperbólico de bordes rectos propuesto-

Comprobación:

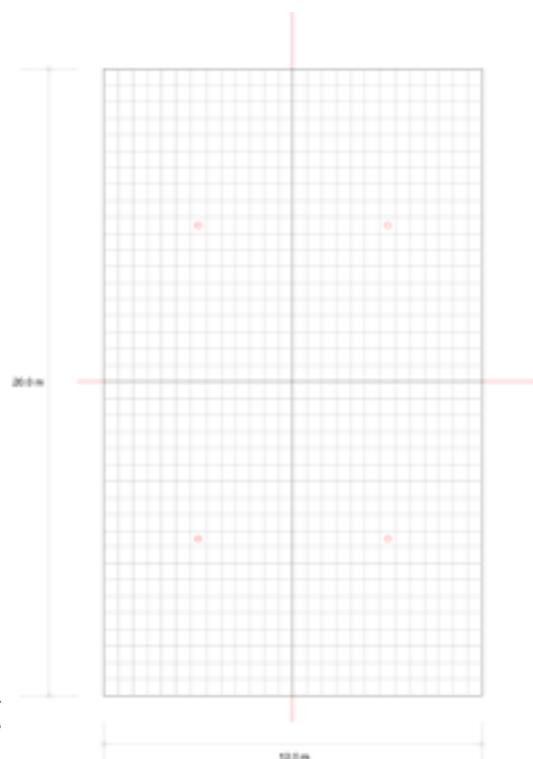
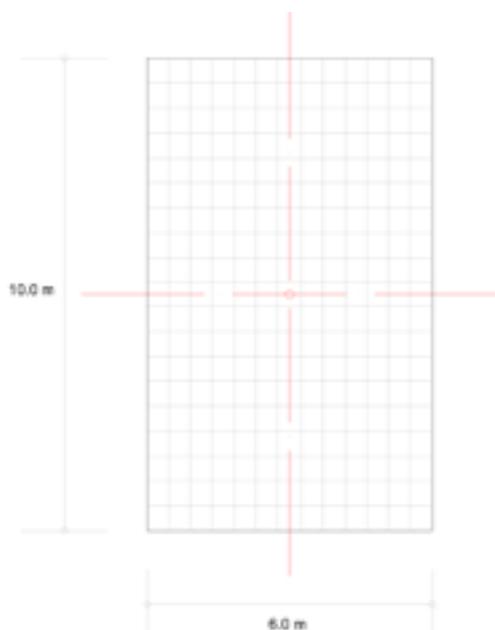
$$Z = kYX$$

$$k = Z/YX$$

$$k = 1.5 / (5 \cdot 3)$$

$$k = 0.1$$

	X	Y	Z = kYX
<b>Punto 1</b>	0	0	$(0.1) \cdot (0) \cdot (0) = 0$
<b>Punto 2</b>	3	0	$(0.1) \cdot (0) \cdot (3) = 0$
<b>Punto 3</b>	3	5	$(0.1) \cdot (5) \cdot (3) = 1.5$
<b>Punto 4</b>	0	5	$(0.1) \cdot (5) \cdot (0) = 0$

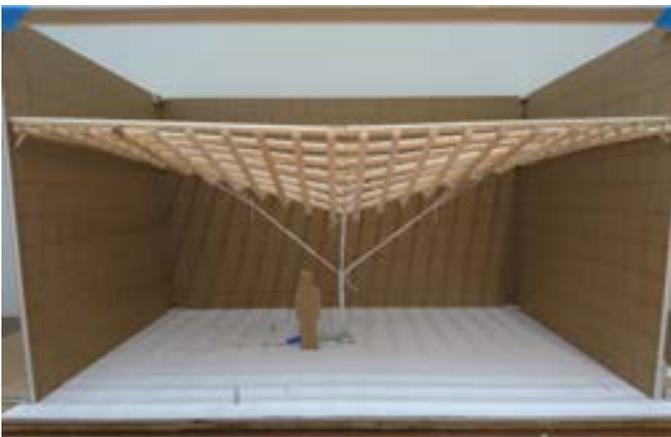


-En el lado izquierdo se muestra la configuración de un paraguas usando el paraboloide propuesto, así como su simetría, del lado derecho la conformación de la cubierta y las dimensiones generales-

## 6.2. Estructura Arbórea

El diseño que se puede observar del paraguas responde al desarrollo necesario para un sistema tipo de la estructura arbórea. Al encontrarse los esfuerzos sobre el borde recto del paraboloide se determinó separar la última barra 0.25 m de este borde evitando así tener un doble borde, por la unión con el siguiente paraboloide, del mismo modo, con esta separación las ramificaciones partirán de un lugar muy cercano al borde y ya que este se encuentra en voladizo, se garantiza que a partir de esta última barra se tomen los esfuerzos necesarios.

Para empezar el diseño de las ramificaciones fue necesario hacer un modelo funicular para observar el comportamiento real del sistema arbóreo. Este modelo fue recreado a una escala 1:20, considerando un solo paraguas de la cubierta y utilizando hilos.



Como se puede observar este tipo de modelo permite el experimentar con diferentes configuraciones para la estructura arbórea, pues al tener localizados los puntos sobre los cuales se anclarán las ramificaciones, basta con estirar y amarrarlo para notar la forma que adopta. Al utilizar este tipo de modelos funiculares se garantiza que las formas obtenidas trabajen de forma axial, dado que dentro de los hilos solo se encuentran fuerzas a tracción y al replicar esto en la realidad, no será necesario trabajar bajo otro tipo de esfuerzos.

Asimismo, este modelo permite analizar aspectos para las siguientes etapas en el desarrollo del proyecto, como el hecho de que para el primer nivel de las ramificaciones, las que parten del paraboloide, deberán de estar mucho más separadas a lo largo, pues los ángulos que se forman en estas son muy agudos y cuando se utilicen secciones reales habría problemas de interferencias.

También se puede inferir que será necesario manejar varios tipos de secciones, pues en el apoyo es donde se juntan todos los hilos y esfuerzos, por lo que una sección mayor será requerida en comparación con las ramificaciones del segundo nivel donde la cantidad de hilos es menor y podría necesitar una sección menos robusta.



- Fotos del modelo funicular obtenido bajo el sistema de cubierta y apoyo seleccionados para el proyecto, la separación entre las primeras ramificaciones permite tener ángulos más amplios entre ellos y un área más estable de soporte -

Cabe destacar las diferencias que se pueden encontrar entre las primeras maquetas y modelos digitales y esta, como las direcciones de las ramificaciones, las cuales para los modelos anteriores daban quiebres inusuales en comparación a estos, los cuales se pueden observar mucho más naturales siguiendo el camino óptimo al apoyo.

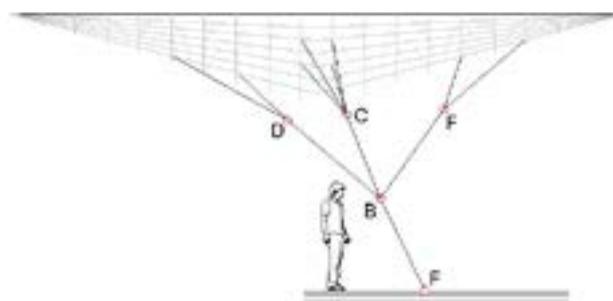
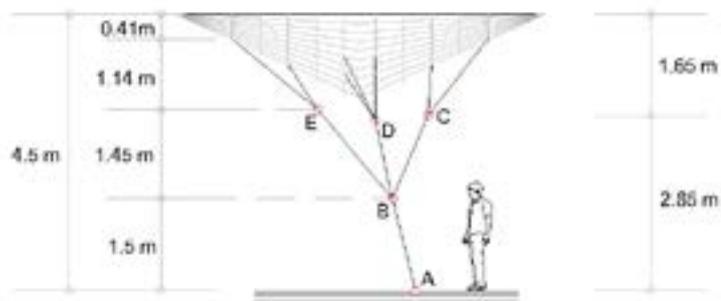
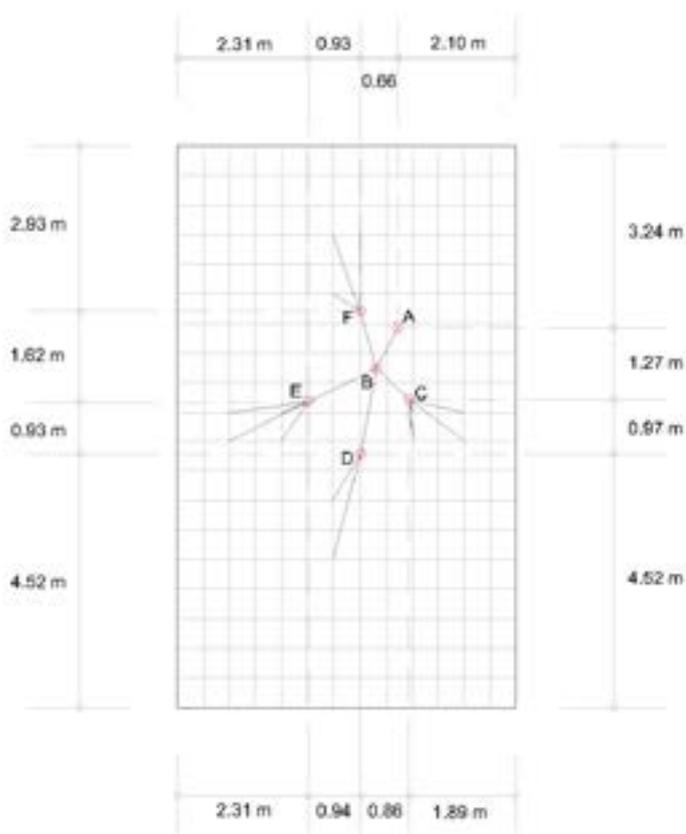
Bajo este modelo físico experimental se tomaron todas las medidas necesarias para replicarlo de forma digital y poder seguir con el desarrollo de este proyecto. Aquí muestro el planteamiento obtenido:

Puntos de la estructura arbórea:

**C, D, E, F** (puntos de unión para las ramificaciones del 1er nivel)

**B** (punto de unión para las ramificaciones del 2do nivel)

**A** (punto de unión entre el edificio y la estructura arbórea)



-Del lado izquierdo se muestra el alzado frontal y del lado derecho el lateral, con esto se puede observar las distintas alturas de estructura y las diferentes direcciones de las ramificaciones.-

### Coordenadas

	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
<b>Punto A</b>	0	0	0
<b>Punto B</b>	-0.37	-0.72	1.50
<b>Punto C</b>	0.21	-1.27	2.86
<b>Punto D</b>	-0.65	-2.24	2.77
<b>Punto E</b>	-1.59	-1.31	2.95
<b>Punto F</b>	-0.66	0.31	2.95



- Renders de la cubierta y la estructura arbórea donde se puede apreciar su ubicación, así como las vistas que se ofrecen de sus alrededores. Se puede notar la propuesta de solución para los nodos de las ramificaciones y el anclaje articulado a la base del edificio -

## 7. Análisis de Materiales y Cargas

Para determinar el peso de la cubierta, lo primero que se debe hacer es definir el tipo de materiales a utilizar.

Dentro de las denominadas estructuras espaciales o de barras y nodos, podemos encontrar que el material predominante en su construcción es el acero, esto por la capacidad que tiene para tomar esfuerzos a compresión y tracción por igual. Así mismo, para la solución de uniones entre barras existen numerosas propuestas dado su versatilidad; sin embargo podemos encontrar otras opciones en los materiales que bien puede usarse para la construcción de estas estructuras. La madera, los plásticos o el bambú brindan una alternativa ecológica, económica y novedosa.

El uso del bambú como material para la construcción no es nada nuevo y su desarrollo para los diferentes tipos de aplicaciones dentro del campo de la arquitectura ha tenido varios avances y sigue en constante progreso. Así pues para plantear un proyecto con este material será necesario apoyarse del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México, en su versión actual pues ya se encuentra en el registrado el uso del bambú. En este se encuentra la Norma para la construcción con madera y en donde consideran dos especies de bambú introducidas a territorio mexicano y una nativa. Siendo estas la guadua aculeata, la guadua angustifolia y la bambusa oldhamii y las que con mayor frecuencia son utilizadas en la construcción. Las últimas dos son las que se plantean a usarse en este proyecto.

### -Bambú-

Para construir el paraboloides de la cubierta, se harán dos capas de bambú que pasen de manera longitudinal y transversal cada una, a modo de superficie reglada. Para continuar fue necesario calcular el área de la sección de bambú, cabe mencionar que dentro de sus propiedades físicas el bambú, es un material irregular y para este caso se consideró al bambú como un tubo de sección y espesor constante para simplificar y facilitar el cálculo. Así mismo la Norma Técnica Complementaria para el Diseño y Construcción con Madera dentro de sus especificaciones para el uso estructural del bambú marca que las piezas a emplearse no deben de presentar una conicidad mayor a 1% (apéndice B.2, inciso c).

Bambú Olhamii (Cubierta)

- Diámetro del tallo  $\varnothing = 8 \text{ cm}$
- Espesor de pared  $\pm 0.5 \text{ cm}$
- Densidad  $700 \text{ kg/m}^3$

$$A_t = A_1 - A_2$$

$$A_1 = \pi \cdot r^2 \quad A_2 = \pi \cdot r^2$$

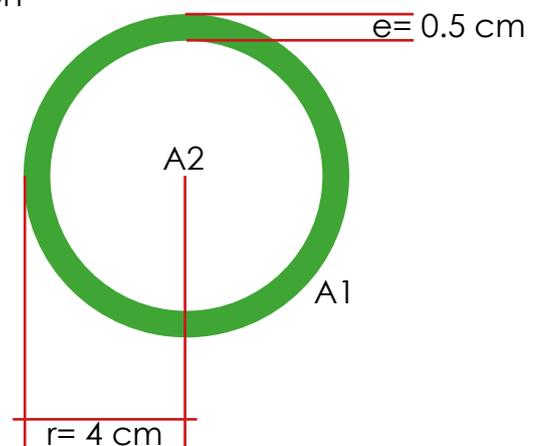
$$A_1 = \pi \cdot (4)^2 \quad A_2 = \pi \cdot (3.5)^2$$

$$A_1 = 50.26 \text{ cm}^2 \quad A_2 = 38.48 \text{ cm}^2$$

$$A_t = 50.26 - 38.38$$

$$A_t = 11.78 \text{ cm}^2 \approx 0.001178 \text{ m}^2$$

Sección



Obtenida el área de la sección se puede calcular el peso de toda la cubierta, haciendo uso de las longitudes de las barras y la densidad del material.

$$w = 700 \text{ kg/m}^3 \cdot 0.001178 \text{ m}^2$$

$$w = 0.8246 \text{ kg/m}$$

Esta carga "w" se multiplica por las longitudes de cada tallo de bambú que se usara para formar el paraboloide de bordes rectos.

Barras del Lecho Inferior

$$T1 = 3.0 \text{ m} \cdot 0.8246 \text{ kg/m} = 2.4738 \text{ kg}$$

$$T2 = 3.002 \text{ m} \cdot 0.8246 \text{ kg/m} = 2.4754 \text{ kg}$$

$$T3 = 3.007 \text{ m} \cdot 0.8246 \text{ kg/m} = 2.4795 \text{ kg}$$

$$T4 = 3.017 \text{ m} \cdot 0.8246 \text{ kg/m} = 2.4878 \text{ kg}$$

$$T5 = 3.03 \text{ m} \cdot 0.8246 \text{ kg/m} = 2.4985 \text{ kg}$$

$$T6 = 3.046 \text{ m} \cdot 0.8246 \text{ kg/m} = 2.5117 \text{ kg}$$

$$T7 = 3.066 \text{ m} \cdot 0.8246 \text{ kg/m} = 2.5282 \text{ kg}$$

$$T8 = 3.09 \text{ m} \cdot 0.8246 \text{ kg/m} = 2.5480 \text{ kg}$$

$$T9 = 3.117 \text{ m} \cdot 0.8246 \text{ kg/m} = 2.5702 \text{ kg}$$

$$T10 = 3.147 \text{ m} \cdot 0.8246 \text{ kg/m} = 2.5950 \text{ kg}$$

Barras del Lecho Superior

$$T11 = 5.0 \text{ m} \cdot 0.8246 \text{ kg/m} = 4.123 \text{ kg}$$

$$T12 = 5.002 \text{ m} \cdot 0.8246 \text{ kg/m} = 4.1246 \text{ kg}$$

$$T13 = 5.009 \text{ m} \cdot 0.8246 \text{ kg/m} = 4.1304 \text{ kg}$$

$$T14 = 5.021 \text{ m} \cdot 0.8246 \text{ kg/m} = 4.1403 \text{ kg}$$

$$T15 = 5.037 \text{ m} \cdot 0.8246 \text{ kg/m} = 4.1535 \text{ kg}$$

$$T16 = 5.058 \text{ m} \cdot 0.8246 \text{ kg/m} = 4.1708 \text{ kg}$$

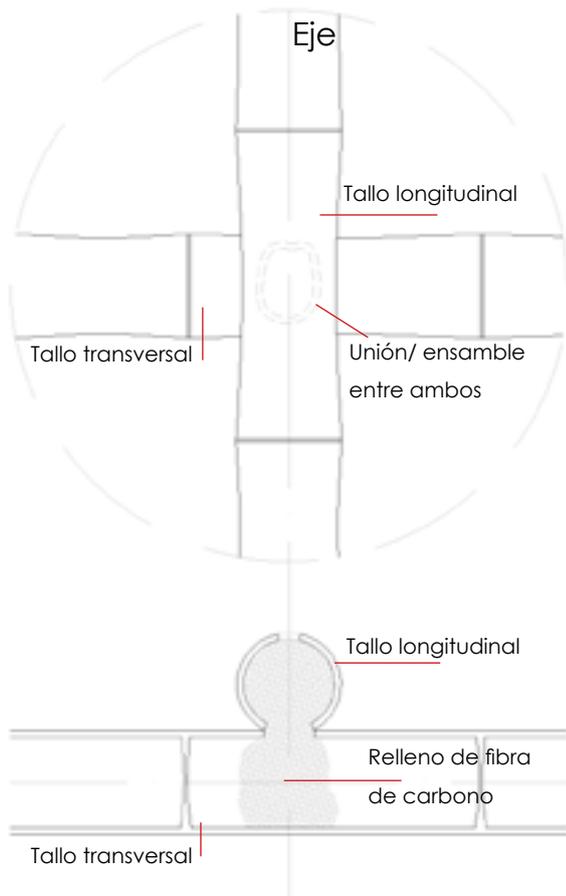
$$T17 = 5.083 \text{ m} \cdot 0.8246 \text{ kg/m} = 4.1914 \text{ kg}$$

$$\sum \text{de pesos} = 54.2021 \text{ kg}$$

## -Fibra de Carbono-

El uso de este material en la arquitectura es realmente nuevo, con muy pocas aplicaciones y limitándose su uso como un refuerzo. Para el presente proyecto su aplicación será implementada en las uniones de la cubierta, entre el cruce de cada tallo longitudinal con el transversal, donde a través de un ensamble se garantiza una mayor área de contacto entre los tallos y la cavidad formada se rellena con la fibra de carbono recortada en pedazos.

En total por cada paraboloides existen 70 intersecciones y el ensamble propuesto va de los 2.5 a los 3 cm de diámetro, se considera utilizar 0.0010 m<sup>3</sup> aproximados de fibra de carbono por cada unión. Aquí se ilustra un detalle.



Metros cúbicos de fibra de carbono:

$$0.0010 \text{ m}^3 * 70 \text{ uniones} = 0.07 \text{ m}^3$$

$$\text{Densidad} = 1750 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso} = 1750 \text{ kg/m}^3 * 0.07 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso} = 122.5 \text{ kg}$$

## -Recubrimiento-

Para tapar la cubierta se propone utilizar tabloncillos de bambú laminado que se colocaran sobre el lecho superior de los tallos del paraboloides.

$$\text{Espesor} = 0.009 \text{ m}$$

$$\text{Densidad} = 1150 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Área del Paraboloides} = 15.37 \text{ m}^2$$

$$\text{Peso} = 1150 \text{ kg/m}^3 * 0.1383 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen} = 15.37 \text{ m}^2 * 0.009 \text{ m} = 0.1383 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso} = 159.07 \text{ kg}$$

### **-Peso Total del Paraguas-**

$$\Sigma \text{pesos} = \text{Tallos de bambú} + \text{Fibra de carbono} + \text{Recubrimiento}$$

$$\Sigma \text{pesos} = 54.2021 \text{ kg} + 122.5 \text{ kg} + 159.07 \text{ kg}$$

$$\Sigma \text{pesos} = 335.77 \text{ kg}$$

Este peso obtenido corresponde a un solo paraboloides de los 4 que conforman al paraguas, así pues tenemos:

$$P_{\text{total}} = 335.77 \text{ kg} * 4 \text{ paraboloides}$$

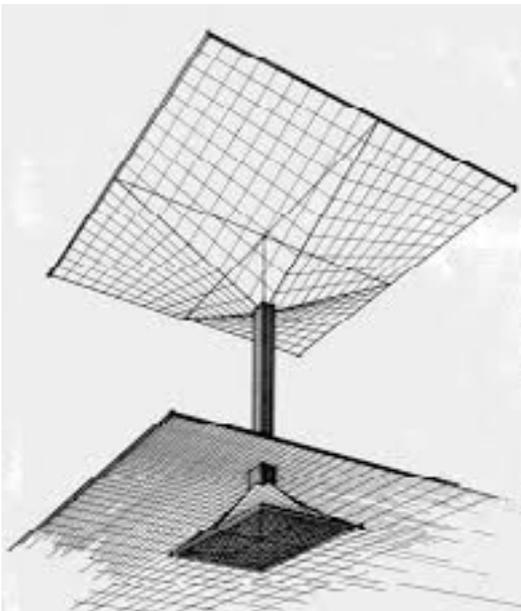
$$P_{\text{total}} = 1343.08 \text{ kg} \approx 1345 \text{ kg}$$

Como se puede apreciar, el uso de un material ligero y resistente en conjunto con un buen diseño geométrico permite tener un cubierta que cubra un espacio de 240 m<sup>2</sup> con un peso reducido. Esto ayudará en gran parte al problema que representa un proyecto de estructura para edificios de carácter antiguo o de cargas adicionales limitadas.

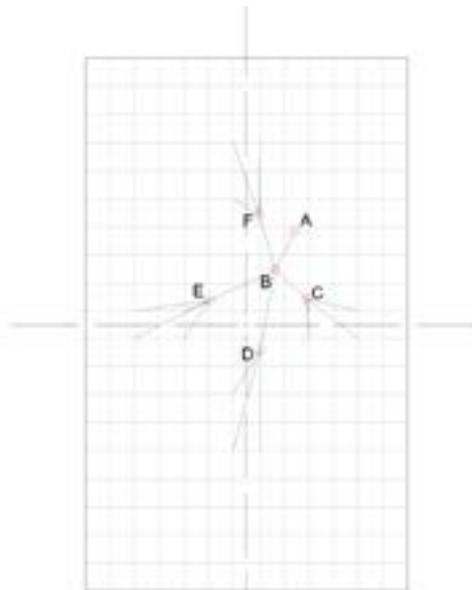
## 8. Análisis estructural

Dado que este proyecto involucra una estructura diferente como la arbórea y de este no se encuentra mucha información sobre cómo realizar el debido análisis estructural para determinar los esfuerzos. El método aquí aplicado parte de la observación, razonamiento y suposición del comportamiento estructural de la misma.

Como ya se ha mencionado, la cubierta de este proyecto es un paraguas formado de paraboloides de bordes rectos, por lo cual una de sus características es concentrar su peso en un solo punto localizado en la zona donde se unen los 4 paraboloides y que es precisamente el centro de la misma. Partiendo de esta hipótesis, se deduce que la mejor forma de tomar esta carga (peso), sería el colocar un apoyo que estuviera en la misma dirección donde actúa la fuerza. El problema está en que para la estructura arbórea las ramificaciones que se generan forman ángulos distintos por lo cual el análisis de las mismas se complica.

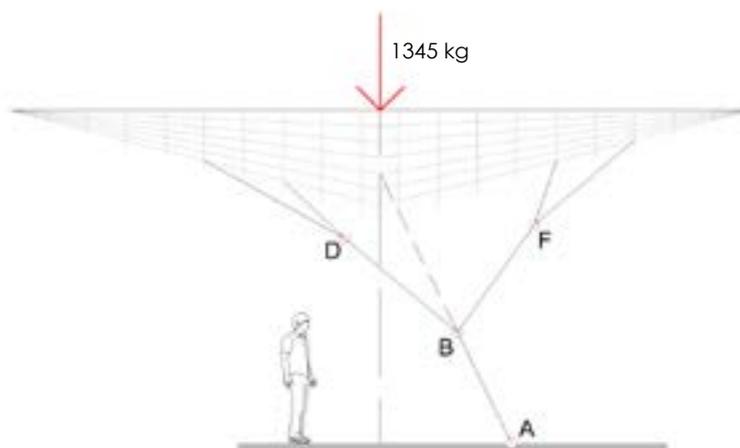


-Dibujo de un paraguas donde se pueden observar los 4 paraboloides que lo conforman, así como el apoyo localizado al centro de la unión de los mismos.-



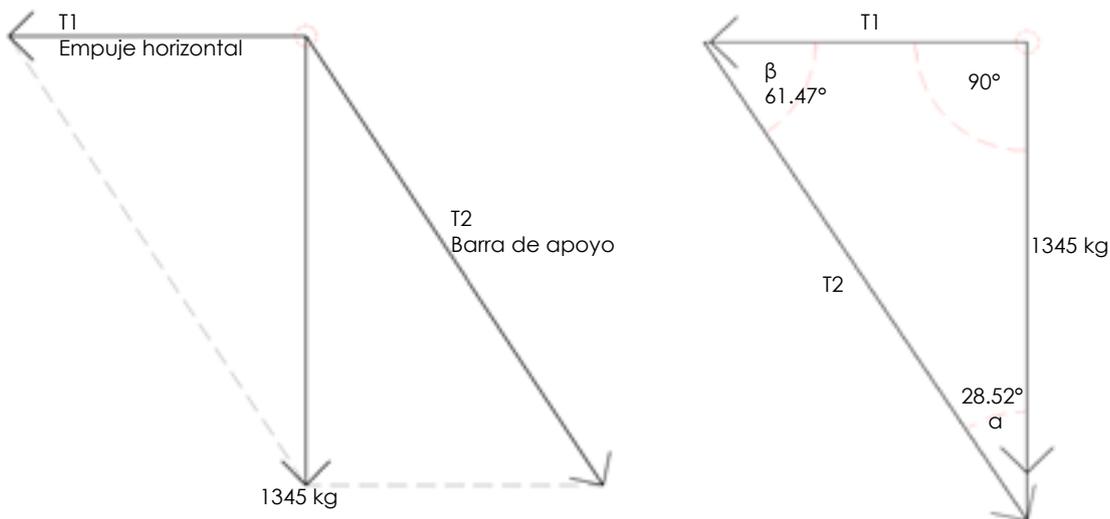
-Esquema de la planta del proyecto actual, se puede ver el centro de la unión de los 4 paraboloides y todas las ramificaciones.-

La solución propuesta es simplificar el problema a solo tomar en cuenta la dirección de la ramificación del apoyo, el cual llega al punto estructural de la azotea, con esto se puede realizar una sencilla descomposición de fuerzas para así conocer el esfuerzo que hay en la barra y el empuje horizontal de la cubierta.



-Esquema-

## Diagrama de Simplificación



### Relación

$$T1/(\text{Sen}(28.52)) = T2/(\text{Sen}(90)) = 1345/(\text{Sen}(61.47))$$

$$T1/0.4774 = T2/1 = 1530.90$$

$$T1 = 1530.90 * 0.4774$$

$$T1 = 730.85 \text{ kg}$$

$$T2 = 1530.90 * 1$$

$$T2 = 1530.90 \text{ kg}$$

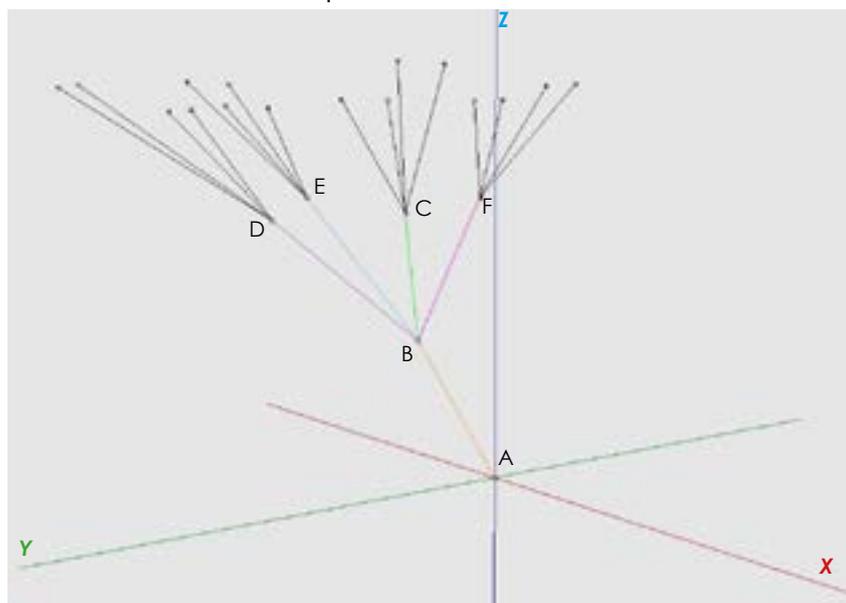
Una vez obtenida la fuerza que actúa dentro de la barra de apoyo se puede dar paso a la distribución de esta por cada una de las ramificaciones, haciendo uso del mismo razonamiento de que una fuerza se puede descomponer en diferentes vectores en el espacio. El problema que se presenta es que en el nodo "B" concurren 5 barras, 4 del primer nivel y una del apoyo y de las cuales solo conocemos la magnitud de esta última. Aun cuando esto representa una dificultad, sigue existiendo una solución.

El modo de abordar esta situación responde a las tres ecuaciones de equilibrio en el espacio:

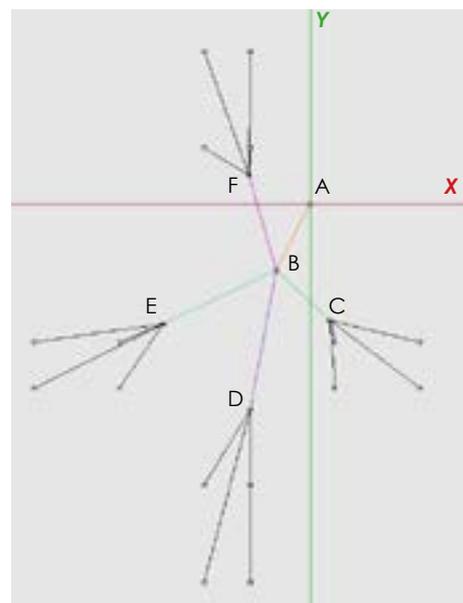
$$\sum f_x = 0, \quad \sum f_y = 0, \quad \sum f_z = 0$$

Como cada barra que llega al nodo "B" tiene un ángulo distinto en el espacio, se puede empezar el desarrollo haciendo uso del método de los cosenos directores. Este consiste en obtener la componente de cada barra para el X, Y, Z.

Un aspecto importante para este método es que, entre más barras tenga el nodo, más componentes habrá y se extenderá el trabajo para poder solucionarlo, por eso, aquí se vuelve necesario el acomodo de los ejes, ya que al situar uno de ellos sobre la misma dirección de una barra, esta incógnita desaparece y podemos disminuir la complejidad analítica de todo el problema.



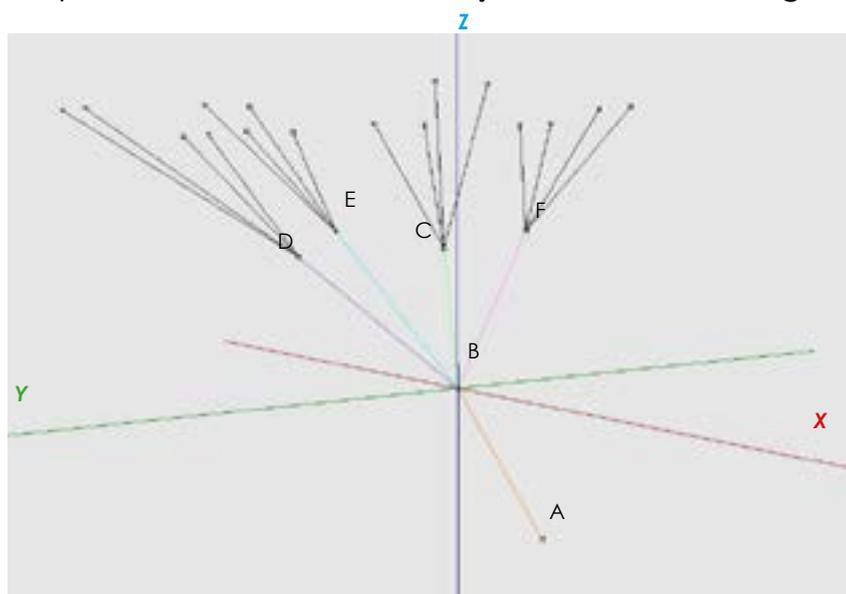
-Isométrico-



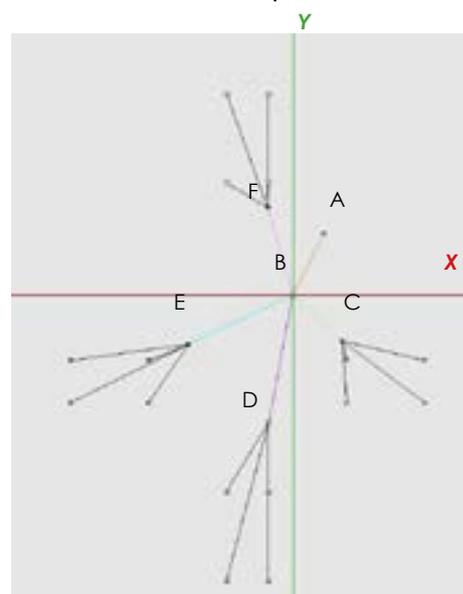
-Planta-

Para dar comienzo a esta etapa, primero es necesario tener identificado todos los datos a utilizarse como los ejes, en este caso el origen de las coordenadas X, Y, Z, se localiza en el punto "A" el cual es también el punto de anclaje real dentro del proyecto. De igual modo tenemos en distintos colores las barras que conforman a la estructura arbórea, en naranja la barra "AB", en verde la barra "BC", en morado la barra "BD", en azul la barra "BE" y en rosa la barra "BF".

Como ya hemos obtenido anteriormente la fuerza que actúa dentro de la barra de apoyo "AB", el problema se concentra en las ramificaciones del segundo nivel. Así pues podemos empezar el acomodo de los ejes, moviendo el origen de los mismos hacia el punto "B".

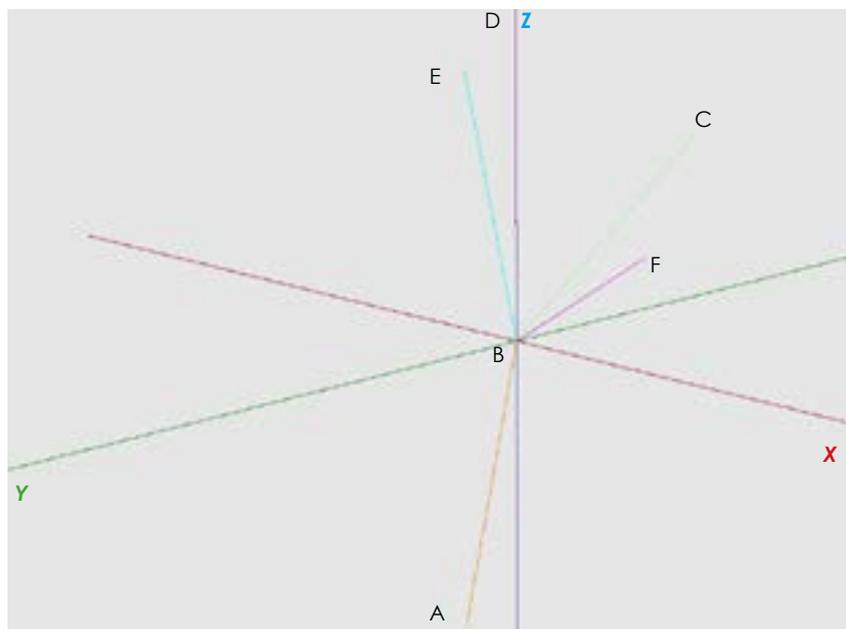


-Isométrico-

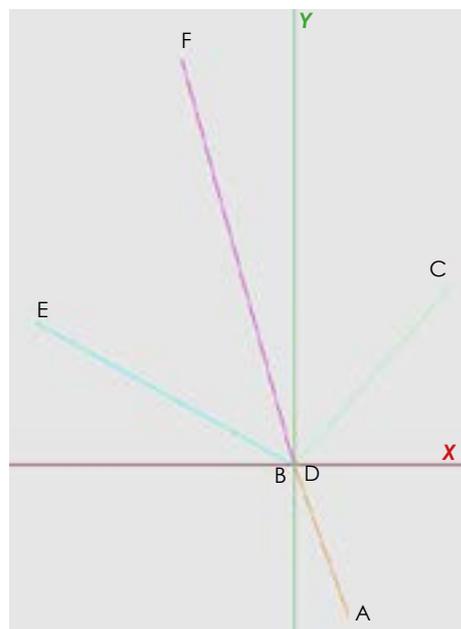


-Planta-

En este punto, debemos de buscar el acomodo necesario para que una de las barras del segundo nivel quede sobre alguno de los ejes para poder reducir las incógnitas. Podemos tomar la barra "BD" y hacer un giro hacia la izquierda partiendo del origen o punto "B" y acomodarla sobre el eje Y visto en planta, después podemos hacer otro giro hacia la derecha partiendo del origen o punto "B" y acomodarla esta vez sobre el eje Z visto en alzado.



-Isométrico-



-Planta-

Con esta nueva posición de las barras se puede dar paso a obtener las coordenadas con respecto a los ejes y así poder aplicar las ecuaciones de equilibrio.

Barra	X	Y	Z
<b>AB</b>	0.2328	-0.6508	-1.5335
<b>BC</b>	0.6716	0.7714	1.2060
<b>BD</b>	0	0	2.0005
<b>BE</b>	-1.0955	0.6106	1.5465
<b>BF</b>	-0.4760	1.7321	0.1922

### Cosenos Directores

#### AB

$$\theta_x = 0.2328 / \sqrt{(0.2328)^2 + (0.6508)^2 + (1.5335)^2} = 0.2328 / 1.682 = 0.1384$$

$$\theta_y = 0.6508 / \sqrt{(0.2328)^2 + (0.6508)^2 + (1.5335)^2} = 0.6508 / 1.682 = 0.3869$$

$$\theta_z = 1.5335 / \sqrt{(0.2328)^2 + (0.6508)^2 + (1.5335)^2} = 1.5335 / 1.682 = 0.9117$$

$$F_x = 1530.9 \times \cos 82.04^\circ = 211.88 (+)$$

$$F_y = 1530.9 \times \cos 67.23^\circ = 592.31 (-)$$

$$F_z = 1530.9 \times \cos 24.25^\circ = 1395.72 (-)$$

## BC

$$\theta_x = 0.6716 / \sqrt{(0.6716)^2 + (0.7714)^2 + (1.2060)^2} = 0.6716 / 1.5812 = 0.4247 \quad F_x = 0.4247 \times BC (+)$$

$$\theta_y = 0.7714 / \sqrt{(0.6716)^2 + (0.7714)^2 + (1.2060)^2} = 0.7714 / 1.5812 = 0.4878 \quad F_y = 0.4878 \times BC (+)$$

$$\theta_z = 1.2060 / \sqrt{(0.6716)^2 + (0.7714)^2 + (1.2060)^2} = 1.2060 / 1.5812 = 0.7627 \quad F_z = 0.7627 \times BC (+)$$

## BE

$$\theta_x = 1.0955 / \sqrt{(1.0955)^2 + (0.6106)^2 + (1.5465)^2} = 1.0955 / 1.9911 = 0.5501 \quad F_x = 0.5501 \times BE (-)$$

$$\theta_y = 0.6106 / \sqrt{(1.0955)^2 + (0.6106)^2 + (1.5465)^2} = 0.6106 / 1.9911 = 0.3066 \quad F_y = 0.3066 \times BE (+)$$

$$\theta_z = 1.5465 / \sqrt{(1.0955)^2 + (0.6106)^2 + (1.5465)^2} = 1.5465 / 1.9911 = 0.7767 \quad F_z = 0.7767 \times BE (+)$$

## BF

$$\theta_x = 0.4760 / \sqrt{(0.4760)^2 + (1.7321)^2 + (0.1922)^2} = 0.4760 / 1.8065 = 0.2634 \quad F_x = 0.2634 \times BF (-)$$

$$\theta_y = 1.7321 / \sqrt{(0.4760)^2 + (1.7321)^2 + (0.1922)^2} = 1.7321 / 1.8065 = 0.9588 \quad F_y = 0.9588 \times BF (+)$$

$$\theta_z = 0.1922 / \sqrt{(0.4760)^2 + (1.7321)^2 + (0.1922)^2} = 0.1922 / 1.8065 = 0.1063 \quad F_z = 0.1063 \times BF (+)$$

## Ecuaciones de equilibrio

$$\sum f_x = 0$$

$$211.88 + 0.4247 BC - 0.5501 BE - 0.2634 BF = 0$$

$$0.4247 BC - 0.5501 BE - 0.2634 BF = -211.88$$

$$\sum f_y = 0$$

$$-592.31 + 0.4878 BC + 0.3066 BE + 0.9588 BF = 0$$

$$0.4878 BC + 0.3066 BE + 0.9588 BF = 592.31$$

$$\sum f_z = 0$$

$$-1395.72 + 0.7627 BC + 0.7767 BE + 0.1063 BF + BD = 0$$

$$0.7627 BC + 0.7767 BE + 0.1063 BF + BD = 1395.72$$

Con el sistema de ecuaciones ya establecido, es posible resolver el problema aplicando una matriz, en la cual se usan los coeficientes obtenidos de las barras para cada ecuación y por medio de multiplicaciones entre coeficientes estos se irán reduciendo hasta alcanzar un nivel en el que solo nos quede una incógnita y la cual podremos determinar por medio de un despeje.

	<b>BC</b>	<b>BE</b>	<b>BF</b>	
Fx	0.4247	-0.5501	-0.2634	211.88
Fy	0.4878	0.3066	0.9588	-592.31
Fz	0.7627	0.7767	0.1063	-1395.72
		0.3985	0.5356	-354.9
		0.7493	0.2459	-754.36
			-0.3034	-34.68

$$-0.3034 \text{ BF} = -34.68$$

$$\text{BF} = -34.68 / (-0.3034) = 114.30 \text{ kg (barra a tracción)}$$

A partir de este punto ya podemos solucionar el problema e ir conociendo los esfuerzos de cada barra. Ya que hemos encontrado el esfuerzo en la barra "BF", sustituyendo este valor en la siguiente ecuación podemos encontrar el valor de la barra "BE".

$$0.3985 \text{ BE} + 0.5356 \text{ BF} = -354.9$$

$$0.3985 \text{ BE} + 61.22 = -354.9$$

$$0.3985 \text{ BE} = -354.9 - 61.22$$

$$\text{BE} = (-416.12) / (0.3985) = -1044.21 \text{ kg (barra a compresión)}$$

Encontrando los valores de las barras "BE y BF", podemos resolver la ecuación de equilibrio para  $\sum F_x$  y obtener el valor de la siguiente barra.

$$0.4247 \text{ BC} - 0.5501 \text{ BE} - 0.2634 \text{ BF} = -211.88$$

$$0.4247 \text{ BC} - 574.41 - 30.10 = -211.88$$

$$0.4247 \text{ BC} = -211.88 + 604.51$$

$$\text{BC} = 392.63 / 0.4247 = 924.48 \text{ kg (barra a tracción)}$$

Para obtener el valor de la última barra "BF" basta con resolver la ecuación de equilibrio para  $\sum F_z$ .

$$0.7627 \text{ BC} + 0.7767 \text{ BE} + 0.1063 \text{ BF} + \text{BD} = 1395.72$$

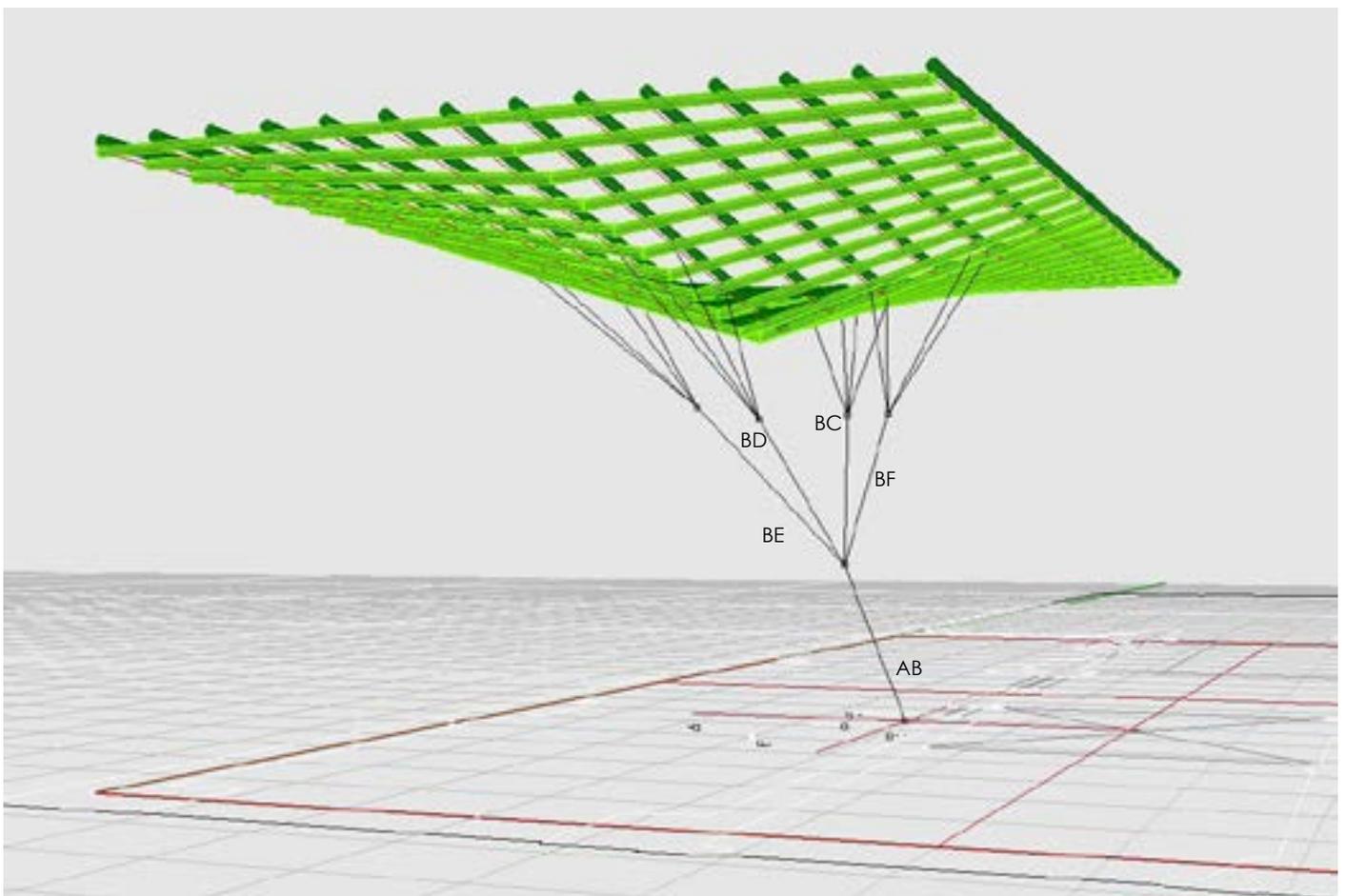
$$705.10 + 811.04 + 12.15 + \text{BD} = 1395.72$$

$$\text{BD} = 1395.72 - 1528.29$$

$$\text{BD} = -132.54 \text{ kg (barra a compresión)}$$

Una particularidad de este método es que al encontrar las fuerzas que actúan en cada barra, el signo con el que se encuentra el resultado indica la forma en que la barra está trabajando, sea tracción para los casos positivos o compresión en aquellos que sean negativos. Este método de cosenos directores para la solución de varias barras que concurren a un nodo se puede volver a aplicar en el primer nivel de las ramificaciones y así determinar en su totalidad las fuerzas actuantes en el conjunto de las barras.

Con este desarrollo podemos darnos cuenta de que, al tratarse de un sistema arbóreo se cumple con la condición de que cada una de las fuerzas encontradas es distinta y el patrón tiende a disminuir, con lo cual es posible emplear diferentes secciones del material para cada barra en específico y así, hacer más ligera y eficiente la estructura. Del mismo modo podemos observar que cada configuración de las barras (sus coordenadas en el espacio) afectan a todo el sistema. Un caso para investigar en este tipo de estructuras es el proceso de la optimización, en el cual por medio de la computadora y el uso de software especializado (arquitectura paramétrica) se busca determinar la mejor dirección de cada una de las barras en donde el esfuerzo, la longitud y la sección sea el mínimo posible a utilizar.



## 8.1. Análisis y diseño de barras

Para poder determinar las dimensiones de las barras que conforman a la estructura arbórea y una vez obtenidas las fuerzas que están presentes dentro de sus elementos, es necesario recurrir a los valores de esfuerzos dados en el Reglamento de construcciones para la Ciudad de México.

Tabla 2.2.9. Valores especificados de resistencia y módulos de elasticidad de bambúes leñosos MPa (kg/cm<sup>2</sup>).

		<i>Guadua aculeata</i>	<i>Guadua angustifolia</i>	<i>Bambusa oldhamii</i>
Flexión	$f_{b'}$	23.2 (235)	25.6 (260)	33.7 (340)
Tensión paralela a la fibra	$f_{tu}$	20.6 (210)	36.4 (370)	58.1 (590)
Compresión paralela a la fibra	$f_{cu}$	16.9 (170)	23.7 (240)	20.4 (205)
Cortante paralelo a la fibra	$f_{vu}$	3.3 (30)	1.9 (18)	2.6 (25)
Módulo de elasticidad promedio	$E_{0.50}$	18 500 (185 000)	18 500 (185 000)	20 500 (205 000)
Módulo de elasticidad correspondiente al 5º percentil	$E_{0.05}$	10 000 (100 000)	12 000 (122 000)	12 000 (122 000)

Se puede deducir al observar los valores proporcionados en la tabla del reglamento, que estos son muy altos y aunque esto no quiere decir que estén mal los valores, al utilizarlos durante el análisis de las piezas puede resultar en dimensiones reducidas que afectará indudablemente a la deformación de la estructura. Para evitar esto en lugar del reglamento se utilizarán los valores para esfuerzos de diseño del bambú obtenidos dentro del proyecto PAPIIT IG-401014.

Especie	Esfuerzo a tensión paralelo a la fibra				Esfuerzo de compresión paralelo a la fibra				Esfuerzo de cortante paralelo a la fibra		
	$\sigma_{max}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_f$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f_{tu}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	E (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{max}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_f$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f_{cu}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	E (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{max}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_f$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f_{vu}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
Oldhami	971.8	210.673	109	45850.9	709.4	502.87	408	51482.96	61.22	28.38	27.33
Guadua Angustifolia	948	258.12	95.8	53282.14	622.7	500.68	525.49	50098.91	63.24	28.58	19.37
Madake	1246.67	344.09	246.64	56736.7	661	521.33	499.36	66871.66	63.37	38.3	29.76

**Donde:**

$\sigma_{max}$  = Esfuerzo máximo

$\sigma_f$  = Esfuerzo de fluencia del bambú

$f_{tu}$  = Valor modificado de esfuerzo a tensión paralelo a la fibra

$f_{cu}$  = Valor modificado de esfuerzo a compresión paralelo a la fibra

$f_{vu}$  = Valor modificado de esfuerzo cortante paralelo a la fibra

E = Módulo de elasticidad

Síntesis de resultados cuantitativos

Como podemos notar dentro de esta tabla el valor de los esfuerzos son menores a los del reglamento, esto a causa de que dichos valores se encuentran dentro del 0.02% correspondiente a las gráficas de esfuerzo/deformación. Esto significa que, al utilizar los valores modificados de la tabla, mantendremos al mínimo la deformación en los elementos.

## **-Barra AB-**

Para la barra de apoyo "AB" se propone un tallo de Guadua Angustifolia de 10 cm de diámetro.

$$\varnothing = 10 \text{ cm}$$

$$e = \pm 0.5 \text{ cm}$$

$$P = 1530.9 \text{ kg}$$

$$A_t = 14.93 \text{ cm}^2$$

$$\sigma = (1530.9 \text{ kg}) / (14.93 \text{ cm}^2) = 102.53 \text{ kg/cm}^2$$

Si comparamos el esfuerzo obtenido con el valor de la tabla para el esfuerzo modificado de tensión, se puede distinguir que el primero es mucho mayor por lo cual es recomendable cambiar la dimensión de la barra.

Segunda Propuesta:

$$\varnothing = 11 \text{ cm}$$

$$e = \pm 0.5 \text{ cm}$$

$$A_t = 16.49 \text{ cm}^2$$

$$\sigma = (1530.9 \text{ kg}) / (16.49 \text{ cm}^2) = 92.85 \text{ kg/cm}^2$$

Para esta nueva propuesta podemos observar que el esfuerzo obtenido se encuentra por debajo del proporcionado en la tabla por lo cual para la barra de apoyo necesitamos de un tallo de bambú de 11 cm de diámetro con un espesor de pared de 5 mm.

Si lo comparamos a una propuesta utilizando los valores del reglamento tendremos.

$$\varnothing = 3.5 \text{ cm}$$

$$e = \pm 0.5 \text{ cm}$$

$$A_t = 4.72 \text{ cm}^2$$

$$\sigma = (1530.9 \text{ kg}) / (4.72 \text{ cm}^2) = 324.34 \text{ kg/cm}^2$$

El esfuerzo obtenido aquí es menor al especificado dentro del reglamento para la tensión paralela a la fibra, pero como se puede suponer al utilizar un tallo de bambú de 3.5 cm de diámetro este tenderá a deformarse demasiado. Teóricamente esta propuesta cumple pero constructivamente no es posible considerar en utilizar estos resultados.

## **-Barras del segundo nivel-**

Como se pudo observar anteriormente, las fuerzas actuantes sobre las barras del segundo nivel fueron todas distintas y menores a la del apoyo. Por lo tanto, para esta parte solo se considerará la barra con el mayor valor por efectos de practicidad y estética.

La barra "BC" tiene una fuerza de tracción de 924.48 kg y se propone utilizar un tallo de Guadua Angustifolia de 8 cm de diámetro.

$$\varnothing = 8 \text{ cm}$$

$$e = \pm 0.5 \text{ cm}$$

$$P = 924.48 \text{ kg}$$

$$A_t = 11.78 \text{ cm}^2$$

$$\sigma = (924.48 \text{ kg}) / (11.78 \text{ cm}^2) = 78.48 \text{ kg/cm}^2$$

Como podemos ver, el diámetro propuesto para esta barra cumple y está dentro del esfuerzo permisible pero queda margen para poder reducir todavía más el diámetro de la barra y no sobrepasar el esfuerzo. Por lo cual se propone un nuevo diámetro para el tallo de bambú de 7 cm.

Segunda propuesta:

$$\varnothing = 7 \text{ cm}$$

$$e = \pm 0.5 \text{ cm}$$

$$A_t = 9.43 \text{ cm}^2$$

$$\sigma = (924.48 \text{ kg}) / (10.21 \text{ cm}^2) = 90.55 \text{ kg/cm}^2$$

Con este nuevo diámetro el esfuerzo encontrado sigue dentro del rango del 0.02% de deformación por lo que, es válido y será usado para las demás barras del segundo nivel.

De este modo podríamos analizar todas y cada una de las barras que conforman a la estructura y sabríamos que diámetros son los óptimos para cada una de sus posiciones y como vimos desde el análisis estructural, así como las fuerzas y esfuerzos actuantes en las barras van disminuyendo conforme estas se ramifican, los diámetros también varían y disminuyen. Cambiando de un diámetro mayor en el apoyo a diámetros reducidos en las barras que conectan a la cubierta. Es importante destacar que el factor constructivo se vuelve relevante pues en una estructura donde convergen 5 barras se requerirá de un diseño a detalle más elaborado para lograr conectar cada una de ellas con todos sus diámetros distintos.

## 9. Factibilidad

El presente capítulo se ha estructurado para presentar una comparación entre 3 sistemas estructurales, con el fin de poder analizar y comparar algunos aspectos presentes en este proyecto.

El primer sistema es el método tradicional de la construcción con concreto armado, pensando en el mismo espacio a cubrir, si se hicieran losas planas de concreto tendríamos.

Espacio a cubrir: 240 m<sup>2</sup>

Losa plana de 5.0 m x 3.0 m

Espesor= 0.10 m

Densidad= 2400 kg/m<sup>3</sup>

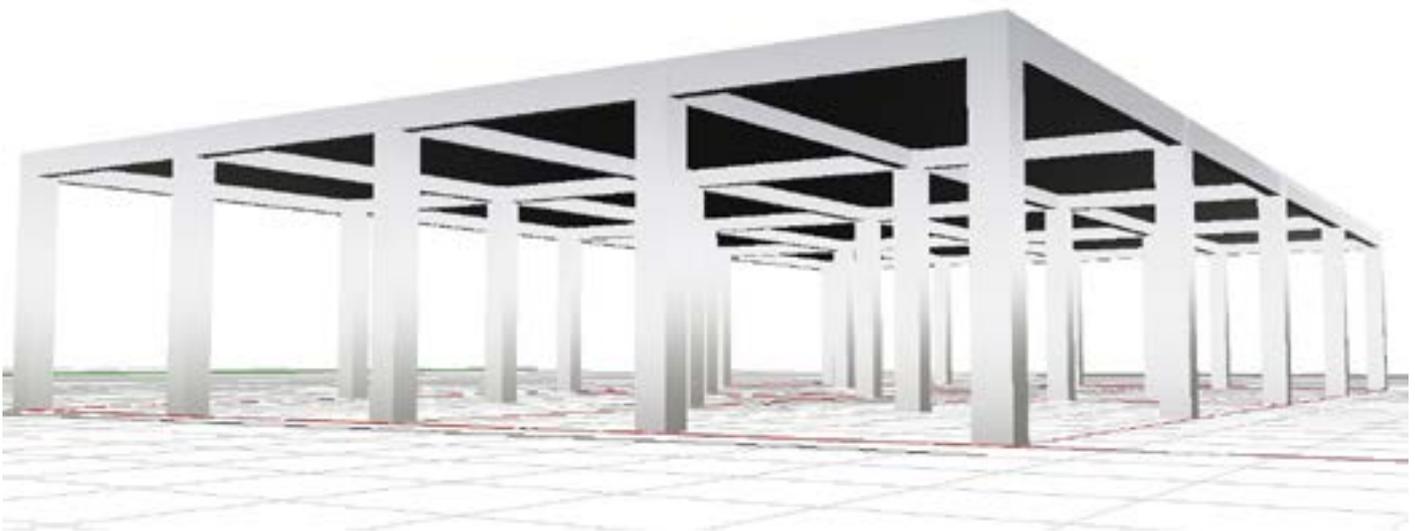
Peso (15 m<sup>2</sup> x 0.10 m) \* 2400 kg/m<sup>3</sup>

Peso= 3600 kg

240 m<sup>2</sup>/ 15 m<sup>2</sup>= 16 losas

Ptotal= 3600 kg x 16

Ptotal= 57,600 kg



Como se puede notar, el uso del concreto armado como material dentro de la construcción de este proyecto elevaría demasiado el peso de la cubierta, a esto hay que añadir que para soportar una losa plana se necesita de al menos 4 apoyos o columnas, esto causaría el tener demasiados esfuerzos transmitidos sobre la azotea de nuestro edificio antiguo.

Este tipo de sistema constructivo, si bien no es tan elaborado, requiere de una cantidad considerable de mano de obra para su ejecución, se tienen que cubrir varios aspectos, como los armados de las columnas, traveses y losas, la cimbra para poder hacer todos los encofrados necesarios y el colado y fraguado del concreto. Cada uno de estos elementos incrementa el tiempo de la construcción y la logística tomaría un papel importante para no encarecer el proyecto.

El segundo sistema a analizar sería una estructura mixta de acero y cristal.

Espacio a cubrir= 240 m<sup>2</sup>  
Viga Principal IPR 8"x 10"  
Peralte= 0.20 m  
Peso= 19.3 kg/m

$240 \text{ m}^2 / 15 \text{ m}^2 = 16 \text{ marcos}$   
 $P_{\text{marco}} = 308.8 + 107.2 + 337.5 = 753.5 \text{ kg}$   
 $P_{\text{total}} = 753.5 \text{ kg} * 16 = 12,056 \text{ kg}$

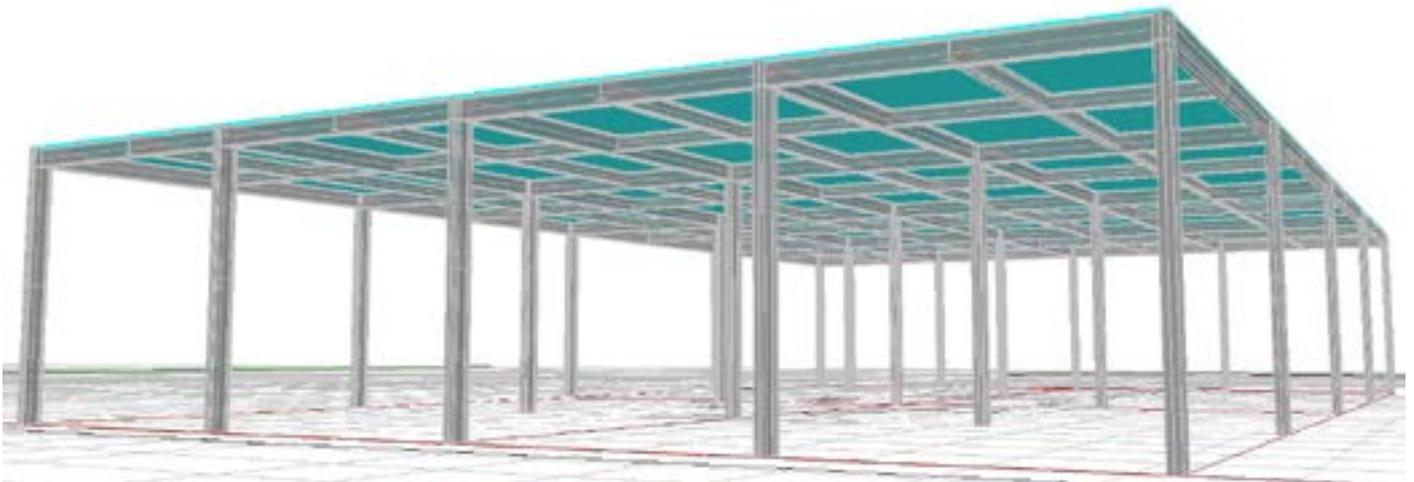
Viga Secundaria IPR 6"x 9"  
Peralte= 0.15 m  
Peso= 13.4 kg/m

Para hacer un marco de acero de 5.0 m x 3.0 m se necesitan 16 m para la viga principal y 8 m para viga secundarias.

Peso viga principal=  $19.3 \text{ kg/m} * 16 \text{ m} = 308.8 \text{ kg}$   
Peso viga secundaria=  $13.4 \text{ kg/m} * 8 \text{ m} = 107.2 \text{ kg}$

De cristal templado para cubrir el marco se utilizarían 15 m<sup>2</sup>

Espesor= .009 m  
Densidad= 2500 kg/m<sup>3</sup>  
Peso=  $(15 \text{ m}^2 * 0.009 \text{ m}) * 2500 \text{ kg/m}^3$   
Peso=  $0.135 \text{ m}^3 * 2500 \text{ kg/m}^3 = 337.5 \text{ kg}$



Bajo este sistema constructivo podemos observar como al tratarse de una estructura mixta se ha reducido considerablemente el peso de la cubierta, sin embargo, se vuelve a presentar el problema con los apoyos, al igual que en la estructura de concreto armado, se requerirán de al menos 4 apoyos por cada marco de acero lo que aumenta demasiado los puntos de anclaje sobre la azotea.

Si bien, las bondades de este sistema constructivo radican en la rapidez del montaje y por la tanto en menor cantidad de mano de obra, en esta opción sería necesario el apoyo de maquinaria especializada como una grúa. La logística cobra mayor relevancia para dirigir cada elemento estructural a su posición.

Por último, retomaremos el sistema de paraboloides y estructura arbórea con bambú.

Espacio a cubrir= 240 m<sup>2</sup>

Cubierta de bambú, fibra de carbono y panel laminado

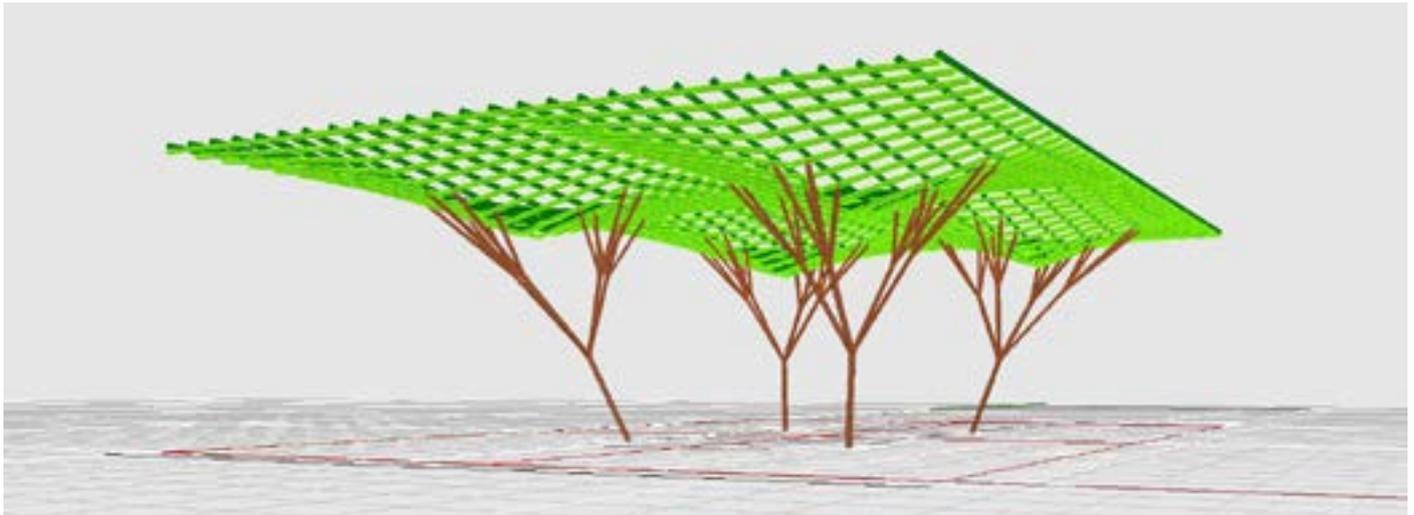
Peralte= 0.18 m

Paraguas que conforma la cubierta

Peso= 1345 kg

Para cubrir en su totalidad el espacio de la azotea se necesitan 4 paraguas

Ptotal= 1345 kg \* 4 = 5,380 kg



Para este sistema de cubierta, podemos notar de nueva cuenta como se ha disminuido el peso, esto en gran parte por las consideraciones de diseño. Al hacer uso del paraguas el proyecto se ve beneficiado por sus características, lo que permitió tener 4 apoyos para toda la cubierta. De igual manera al utilizar el paraboloides de bordes rectos y a su vez la superficie reglada hacen viable su construcción con bambú.

Para lograr ejecutar este proyecto sería necesario la prefabricación de varios de sus elementos y contar con mano de obra ya tecnicada, puesto que, la preparación del bambú para su uso en la construcción requiere de un trabajo manual, inclusive artesanal. Al utilizar elementos muy livianos e independientes que solo se conectaran, esto no requiere del uso de maquinaria especializada pero si se precisa de una coordinación entre los trabajadores para ir montando cada una de las piezas.

A continuación muestro una tabla comparativa sobre los 3 sistemas analizados, sus pesos, el costo de los materiales, la mano de obra necesaria y el tiempo de ejecución.

	<b>Peso (kg)</b>	<b>Costo del material</b>	<b>Mano de obra (personas)</b>	<b>Tiempo de ejecución</b>
<b>Estructura de Concreto</b>	57'600	\$1'168'000.00	20	45 días
<b>Estructura de Acero</b>	12'056	\$1'600'000.00	12	45 días
<b>Estructura de Bambú</b>	5'380	\$100'000.00	15	60 días

Cabe mencionar que, para esta comparación no se están tomando en cuenta fletes o acarreos del material, la renta y uso de maquinaria especializada, salarios de la mano de obra, así como trámites y permisos ante las autoridades pertinentes.

Como se puede constatar, cada una de las estructuras presentadas es perfectamente factible y construible. La verdadera equiparación, radica en el cómo evaluar si en el proyecto es más conveniente uno sobre los demás.

La construcción con concreto armado es y seguirá siendo la más común a utilizar, la más accesible por sus materiales y su mano de obra, pero plantear su uso en este proyecto donde el peso y la transmisión de estos es vital lo descartaría. Si usamos acero y vidrio logramos bajar el peso transmitido pero sacrificamos el espacio y confort al interior, por lo cual sería necesario anexar aire acondicionado y elementos externos para compensar el problema.

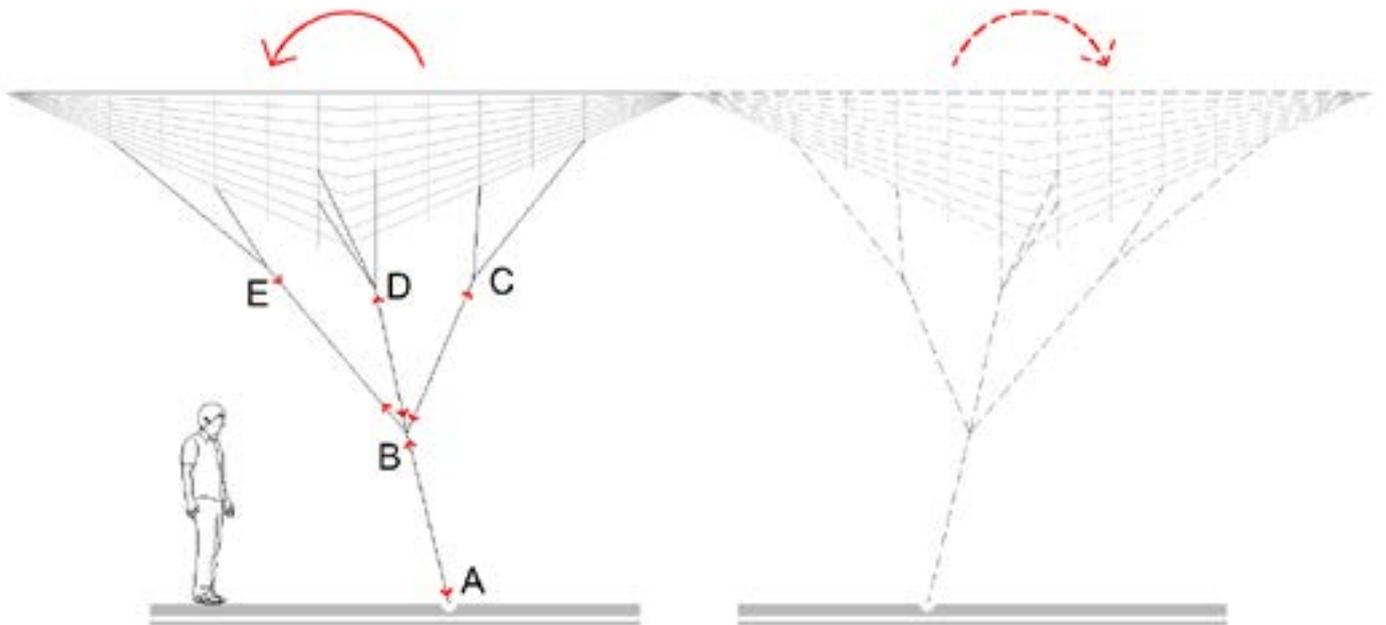
Precisamente en este punto, es donde el diseño de una cubierta ligera realmente cobra importancia, pues el problema no solo radica en el peso de la misma. Se debe analizar el proyecto, saber cómo se transmitirán las cargas, que geometrías se adaptan mejor, saber cómo manipular esas geometrías y anticipar como se comportaran. Bajo estos criterios, el diseño por forma nos brinda la ventaja de hacer observaciones, análisis, experimentaciones y determinaciones sobre cada etapa del proyecto dando como resultado tener una estructura eficiente, estable, estética, construible y ligera.

## 10. Conclusiones.

### Estructurales

Tras una evaluación de la información obtenida por parte del cálculo, es posible asegurar que la estructura arbórea diseñada con nodos articulados cumple con lo previsto. Cada una de las cargas que se obtuvieron dentro de las barras tiende a ser menor que a la barra de apoyo, por lo cual la transmisión de estas cargas hacen que el proyecto cuente con una estructura eficiente y de igual manera se observa un trabajo a tracción de las ramas, dado el ángulo de inclinación del apoyo y el empuje horizontal de la cubierta, por lo que para garantizar el equilibrio de todo el sistema es fundamental su simetría y el trabajo con una estructura idéntica.

Barra	Carga	Trabajo
AB	1530.90	Tracción
BC	924.48	Tracción
BD	132.54	Compresión
BE	1044.21	Compresión
BF	114.3	Tracción



## **Constructivas**

Al considerar la estructura como una de barras y nodos, esto nos brinda beneficios como poder reemplazar una de las barras ya sea por mantenimiento, o para este en específico en el cual se está proponiendo montar sobre un edificio antiguo e histórico, las regulaciones actuales del INAH consideran que en este tipo de proyectos deben de poderse retirar del lugar la estructura en su totalidad y al contar con las articulaciones, esta puede desmontarse sin mayor problema.

De igual forma para poder llevar a cabo este proyecto será necesario la aplicación del Reglamento de construcciones para el Distrito Federal (10ª. Ed. 2019), el cual contempla las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcciones de Estructuras con madera (pág. 1201) y en la cual se especifican valores de resistencia y módulos de elasticidad de tres especies de bambú (pág. 1226, tabla 2.2.9), el Diseño de Miembros Sujetos a Combinaciones de Momento y Carga Axial de Compresión (págs. 1227- 1231, cap. 3.3) y Diseño de Miembros a Combinaciones de Momento y Carga Axial de Tensión (págs. 1231- 1232, cap. 3.4), la Resistencia de miembros de Bambú (págs. 1237- 1239, cap. 6), los Elementos de Unión (págs. 1240- 1256, cap. 8), la Ejecución de la Obra (págs. 1256- 159, cap. 9) y el Apéndice B. Clasificación del Bambú Estructural págs.. 1262- 1263).

## **Académicas**

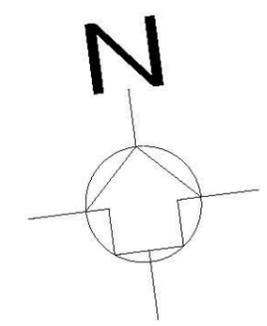
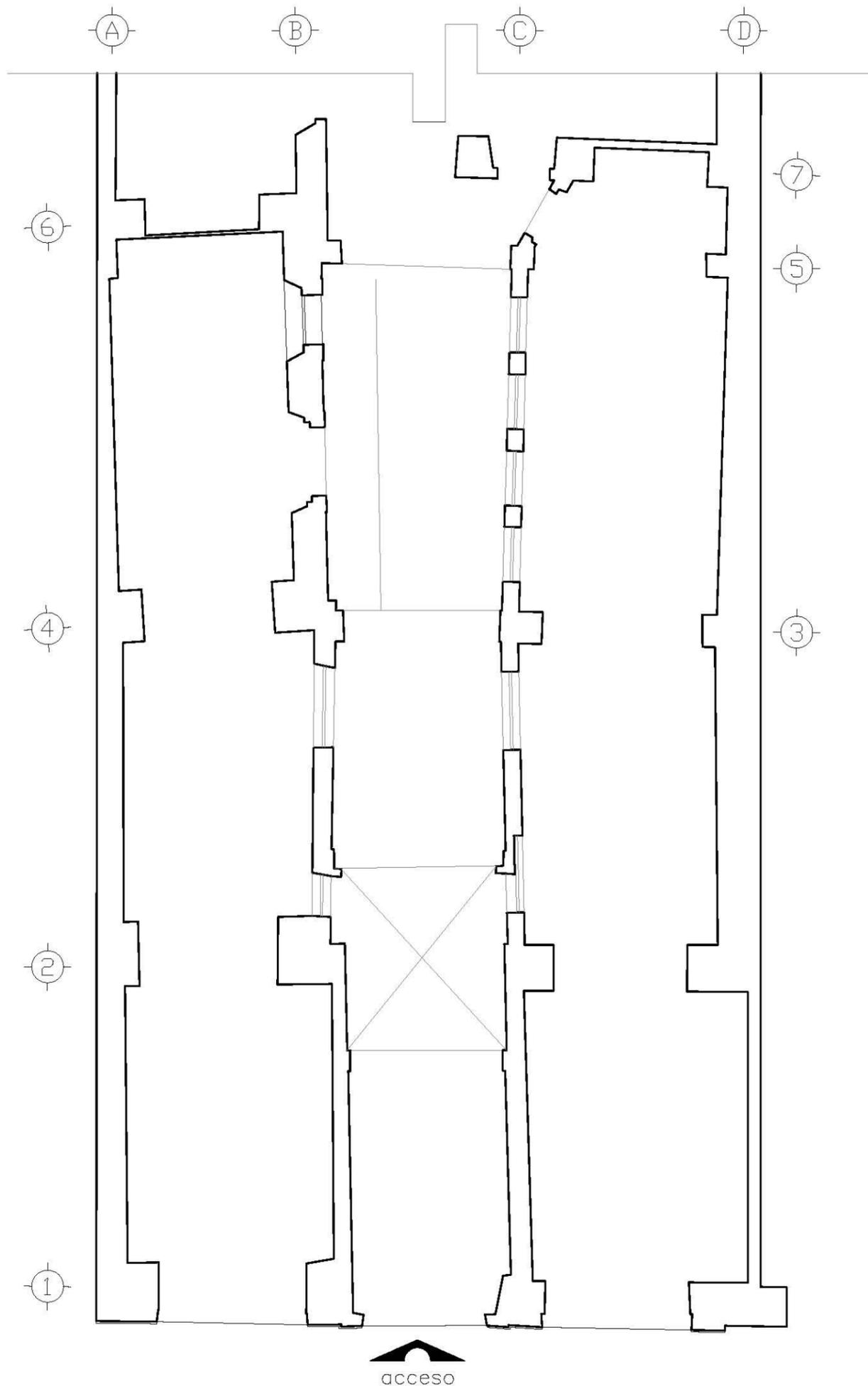
Sin considerar los posibles resultados arquitectónicos del espacio a cubrir, considero que la metodología empleada para el proyecto planteado servirá como otra opción a la amplia gama de las cubiertas y estructuras ligeras. Que el análisis geométrico y estructural aquí propuestos aporte una forma de abordar a las estructuras arbóreas y que fomente el uso de estas.

Asi mismo, este proyecto busca ser fruto de la investigación realizada dentro del Laboratorio de Estructuras del CIAUP, de la Facultad de Arquitectura de la UNAM, con el proyecto PAPIIT IG 401014, en el que se llevó a cabo una extensa serie de estudios para conocer el comportamiento del bambú en su aplicación como elemento estructural, realizando pruebas de cortante, tracción, compresión y flexión a tres especies que se identificaron como las óptimas para ser utilizadas en la construcción (guadua angustifolia, madake y oldhamii). Dentro del mismo proyecto PAPIIT se llevó a cabo un seguimiento a los distintos tipos de amarres en conexiones para la construcción con bambú, fruto del cual surgió una solución que involucra el conocimiento de los ensambles en conjunto con un material novedoso como la fibra de carbón y que demostró ser una buena opción para las uniones, permitiendo el trabajo en conjunto de las fibras del bambú y evitando así las perforaciones que se hacen al utilizar clavos o pernos de acero.

## 11. Bibliografía.

- Peter von Buelow, (2007). "A Geometric Comparison of Branching Structures in Tension and Compression versus Minimal Paths".
- Przemyslaw Prusinkiewicz, (2004). "The Algorithmic Beauty of Plants".
- Marcel Antonio, (2009). "La Esencia del Árbol". Editorial punto aparte, Universidad Nacional de Colombia.
- Simón Luis Arnal y Betancourt Suárez Max, (2019). "Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal". Editorial trillas
- Hernández Hernández Agustín y Trujillo Barragán Magdalena. (2016). Metodología para Determinar Esfuerzos de Diseño del Bambú. ACADEMIAXXII, año 7 (13), 39- 55.

# **ANEXOS**



**NOTAS:**

Estado actual de la planta baja del edificio a restaurar en la calle de Guatemala.

En ningún momento se tomaran medidas sobre los planos, las cotas siempre registrarán sobre el dibujo

TRABAJO TERMINAL:  
"Estructura Arbórea para Habilitar Azoteas en Edificios Históricos"

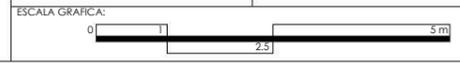
UBICACIÓN:  
Guatemala #24  
Col. Centro Ciudad de México

PLANO:  
Planta Baja -estado actual-

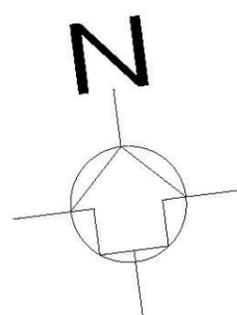
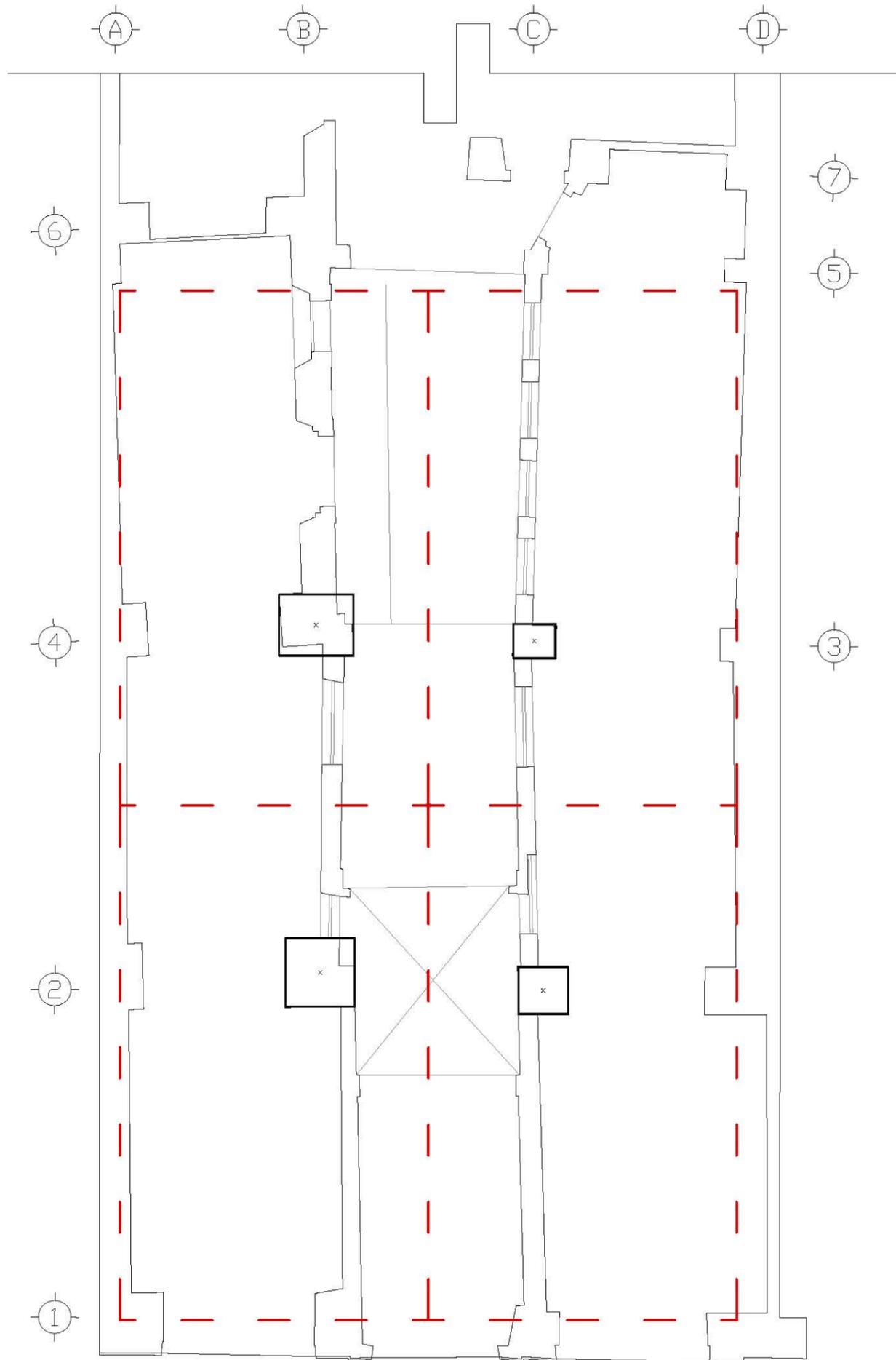
SINODALES: Dr. Agustín Hernández Hdez. Dr. Juan Ignacio del Cueto Arq. José Luis Rincón Arq. ECL. Marcos Ontiveros Arq. Natalia Boo Fontenla	DIBUJO: Arq. Ever Alejandro Pérez
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------

FECHA: 04/Septiembre/2019	COTAS: en metros
------------------------------	---------------------

CLAVE: <b>A-1</b>	ESC:
----------------------	------



acceso



**NOTAS:**

- - - Proyección de los paraguas que componen a la cubierta
- x Puntos de apoyo según su correspondencia a la P.B del sitio.

En ningún momento se tomarán medidas sobre los planos, las cotas siempre registrarán sobre el dibujo

<p>TRABAJO TERMINAL:</p> <p><b>"Estructura Arbórea para Habitar Azoteas en Edificios Históricos"</b></p>	
<p>UBICACIÓN: Guatemala #24 Col. Centro Ciudad de México</p>	
<p>PLANO: Planta Baja -proyección de la cubierta-</p>	
<p>SINODALES: Dr. Agustín Hernández Hdez. Dr. Juan Iganacio del Cueto Arq. José Luis Rincón Arq. ECL. Marcos Ontiveros Arq. Natalia Boo Fontenla</p>	<p>DIBUJO: Arq. Ever Alejandro Pérez</p>
<p>FECHA: 04/Septiembre/2019</p>	<p>COTAS: en metros</p>
<p>CLAVE: <b>A-2</b></p>	<p>ESC:</p>
<p>ESCALA GRAFICA:</p>	



UNAM

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

NOTAS:

En ningún momento se tomarán medidas sobre los planos, las cotas siempre registrarán sobre el dibujo

TRABAJO TERMINAL:

"Estructura Arbórea para Habitar Azóteas en Edificios Históricos"

UBICACIÓN:

Guatemala #24  
Col. Centro Ciudad de México

PLANO:

Planta cubierta y estructura

SINODALES:

Dr. Agustín Hernández Hdez.  
Dr. Juan Ignacio del Cueto  
Arq. José Luis Rincón  
Arq. ECL. Marcos Ontiveros  
Arq. Natalia Boo Fontenla

DIBUJO:

Arq. Ever Alejandro Pérez

FECHA:

04/Septiembre/2019

COTAS:

en metros

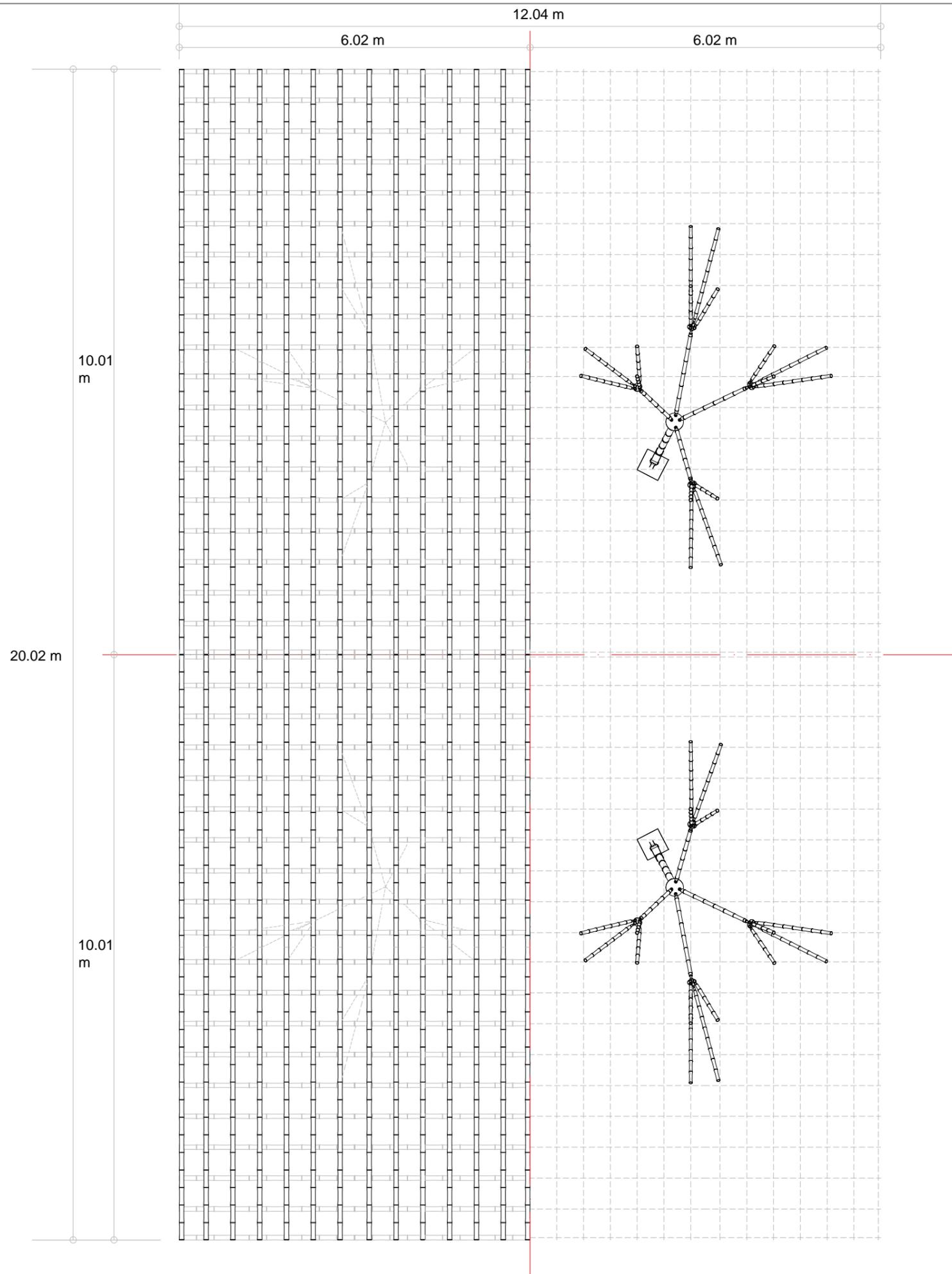
CLAVE:

**A-3**

ESC:

sin escala

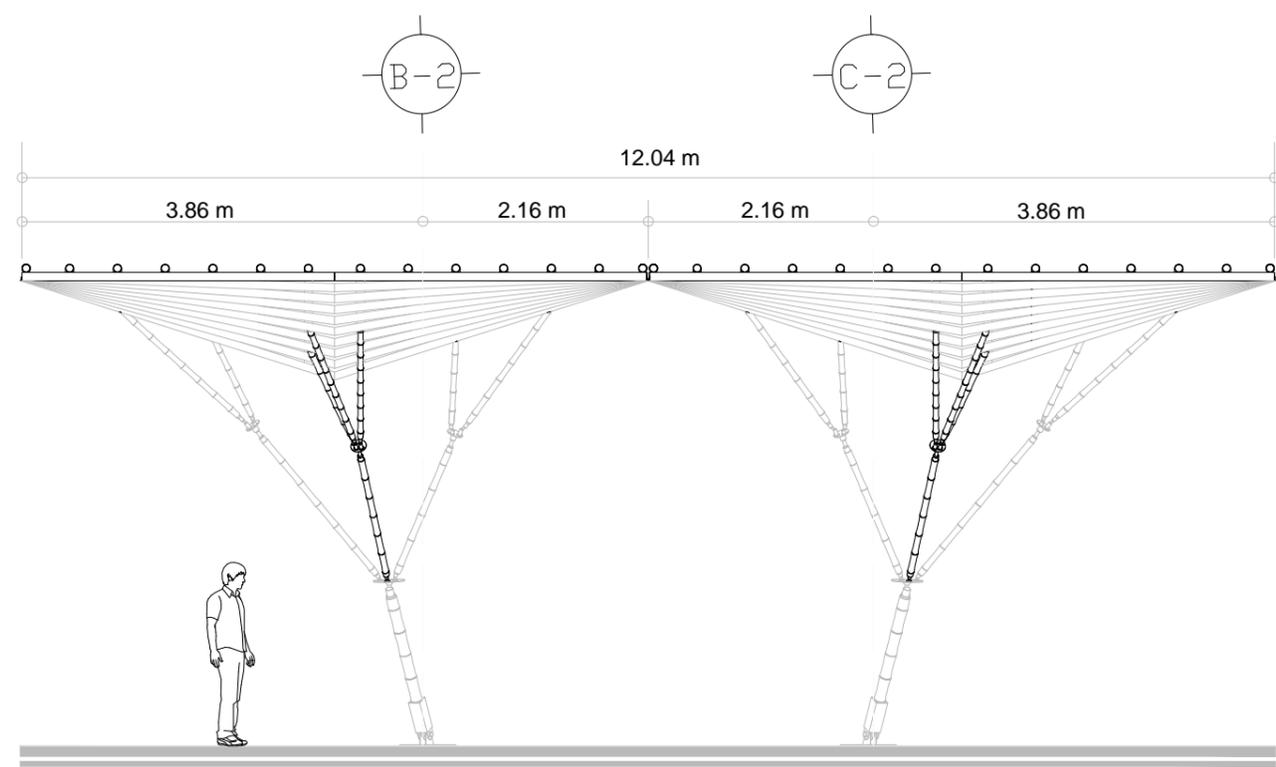
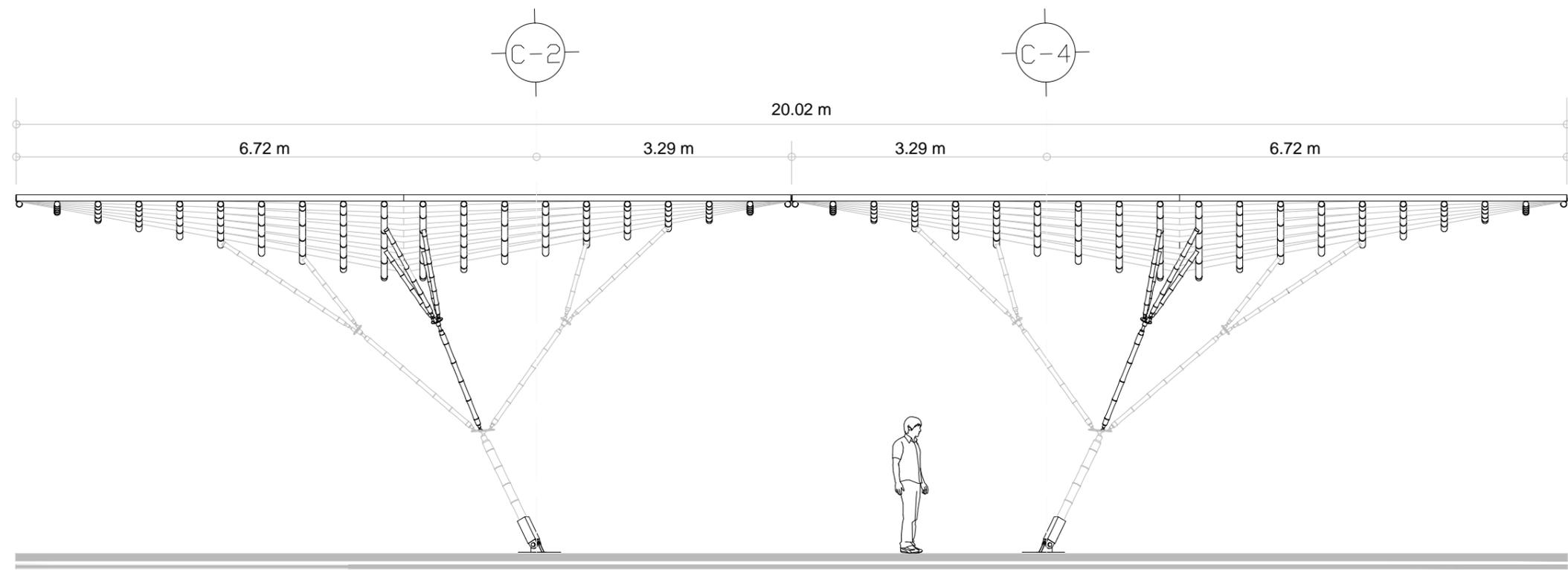
ESCALA GRAFICA:





UNAM

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO



NOTAS:

En ningún momento se tomarán medidas sobre los planos, las cotas siempre registrarán sobre el dibujo

TRABAJO TERMINAL:

"Estructura Arbórea para Habitar Azóteas en Edificios Históricos"

UBICACIÓN:

Guatemala #24  
Col. Centro Ciudad de México

PLANO:

Alzados

SINODALES:

Dr. Agustín Hernández Hdez.  
Dr. Juan Ignacio del Cueto  
Arq. José Luis Rincón  
Arq. ECL. Marcos Ontiveros  
Arq. Natalia Boo Fontenla

DIBUJO:

Arq. Ever Alejandro Pérez

FECHA:

04/Septiembre/2019

COTAS:

en metros

CLAVE:

**A-4**

ESC:

sin escala

ESCALA GRAFICA: