

Desarrollo Simplificado de una Geometría Descriptiva para Cubiertas Transformables Plegables

Simplified Development of a Descriptive Geometry for Folding Transformable Roofs

DOI: 10.17981/mod.arq.cuc.28.1.2022.10

Artículo. Fecha de Recepción: 14/12/2021. Fecha de Aceptación: 24/01/2022.

Carlos Cesar Morales Guzmán 

Universidad Veracruzana. Xalapa (México)
dr.arqmorales@gmail.com

Para citar este artículo:

Morales, C. (2022). Desarrollo Simplificado de una Geometría Descriptiva para Cubiertas Transformables Plegables. *MODULO ARQUITECTURA CUC*, 28, 285–322, 2022.
<http://doi.org/10.17981/mod.arq.cuc.28.1.2022.10>

Resumen

En la presente investigación se desarrolla la adecuación geométrica descriptiva simplificada de un sistema plegable y como desarrollar la modelación de sus partes por medio de programas informáticos de dibujo en CAD, el cual ayudara a generar las interpretaciones de diseño de una cubierta plegable en los espacios arquitectónicos. A partir de una metodología representada por algunos ejemplos a escala se puede interpretar los movimientos de un sistema desplegable y generar un serie de modelos interpretativos, con los cuales se propone formar una estructura desplegable. La investigación se centró en realizar las adecuaciones geométricas de los modelos creados en el laboratorio de estructuras, para mejorar la movilidad y diseño de dichos sistemas, razón por la cual se desarrolló una geometría versátil que fácilmente pudiese desarrollarse y diseñar la modelación de cubiertas flexibles.

Palabras clave: Sistemas Plegables; Metodología del Diseño; Desarrollo Geométrico

Abstract

This investigation develops the simplified descriptive geometric adequacy of a folding system and how to develop the modeling of its parts by means of CAD drawing software, which will help to generate the design interpretations of a folding roof in architectural spaces. From a methodology represented by some scale examples, it is possible to interpret the movements of a deployable system and generate a series of interpretative models, with which it is proposed to form a deployable structure. The research focused on making geometric adaptations of the models created in the structures laboratory, to improve the mobility and design of such systems, which is why a versatile geometry was developed that could easily be developed and design the modeling of flexible roofs.

Keywords: Folding Systems; Design Methodology; Geometric Development

INTRODUCCIÓN

Para realizar geometrías que puedan desarrollarse en estructuras plegable se debe comprender como desarrollar modelos de formas básica, ya que en la actualidad existen softwares los cuales ayudan a generar geometrías orgánicas y juegan un papel importante a la hora de decir como realizar los esquemas básicos de plegabilidad en las estructuras; pero también vale la pena mencionar que no en todos los ámbitos universitarios y profesionales se está al alcance de softwares especializados por ser demasiado caros, por ello esta disertación se centra en facilitar el entendimiento y construcción de geometrías las cuales puedan crear estructuras desplegables en el espacio arquitectónico. Uno de los métodos para verificar si nuestra geometría está definiéndose de forma correcta es la elaboración de modelos físicos. El esquema conceptual que se manejara se desarrollara en base de dibujos de pantógrafos geométricos y descriptivos, con lo cual se conseguirá el desarrollo de una forma geométrica con variaciones y segmentaciones de casi cualquier figura plegable, con pequeñas características del uso de aspas desplegables, lo cual se explicara durante toda la investigación. Generar geometrías adecuadas para el uso de estructuras desplegables, en este caso, nos ayudará a forjar las formas más aproximadas para generar un espacio emergente o itinerante, ya que su formación de diseño se conseguirá por las iteraciones que nos pueda llegar a producir una rejilla geométrica cuadrada con formaciones cilíndricas o esféricas. Para entender

un poco lo que se concebirá, se experimenta con modelos de tijera, en los que se buscara un modelo geométrico basado en principios descriptivos y gráficos con base a los principios matemáticos que se derivarán de cada experimento.

Para entender la obtención de la forma de este tipo de estructura (Figura 1), se toma la referencia del arquitecto Emilio Pérez Piñero

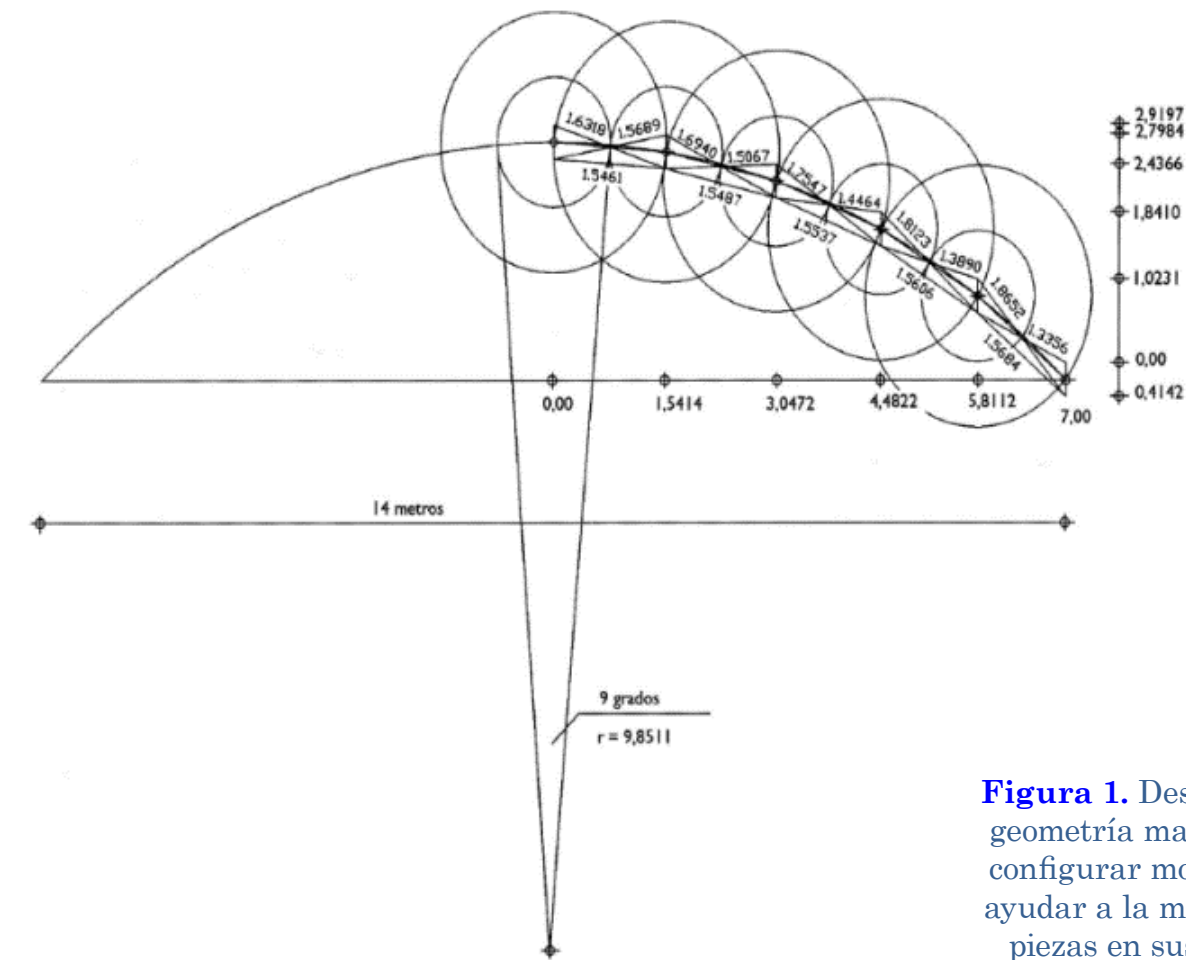
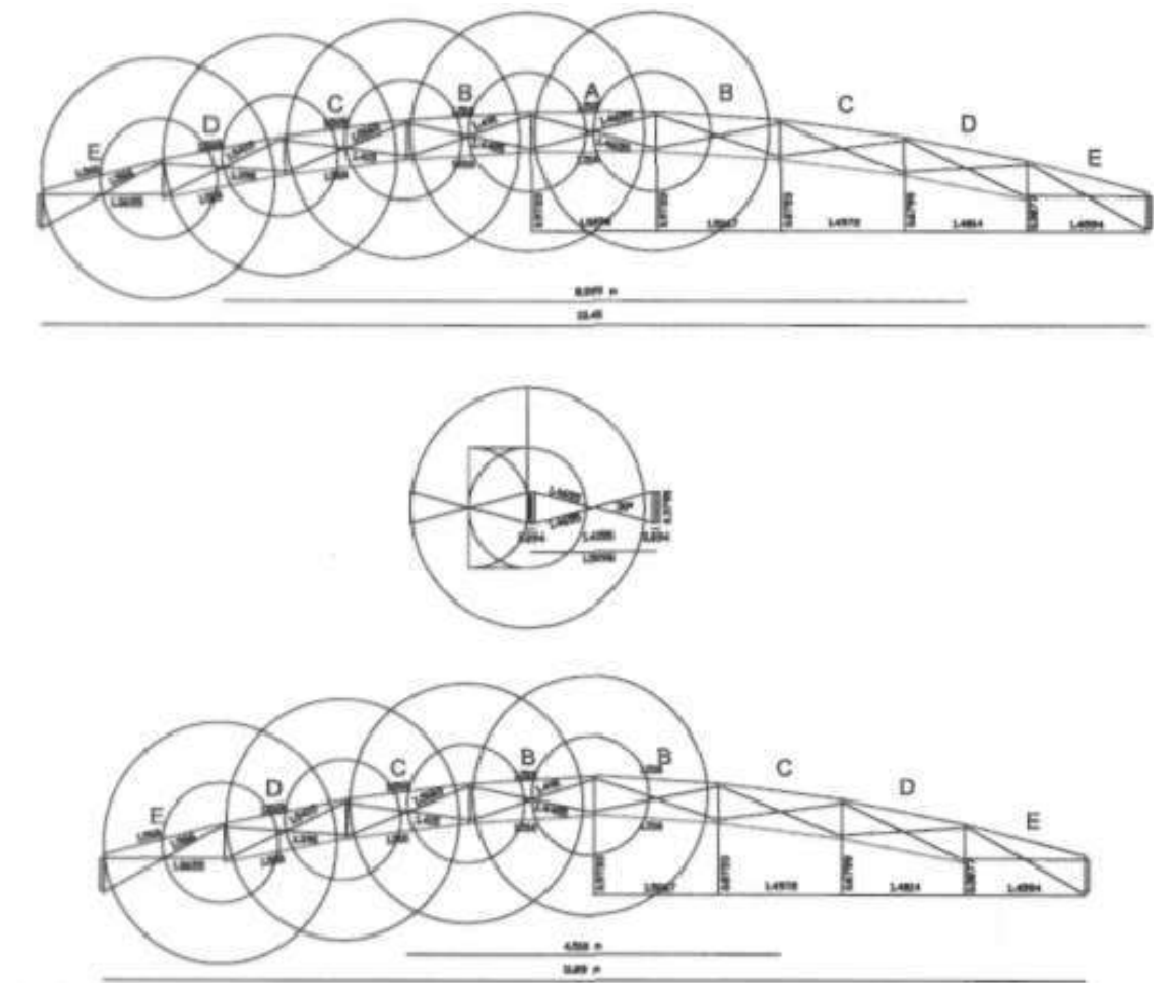


Figura 1. Desarrollo de una geometría matemática para configurar modelos físicos y ayudar a la movilidad de las piezas en sus conexiones.

Fuente: [Sánchez \(1992\)](#).



con su sistema de estructuración recíproca plegable ([Fundación Emilio Pérez Piñero, 2016](#)) y la elaboración geométrica de Dr. Félix Escrig, que determinan una base geométrica para desarrollar, por lo cual se adaptara a estas metodologías de modelaje geométrico, y se utilizaran métodos de configuración traslacional para la generación de la forma; cabe mencionar que la razón de ser

de esta investigación es la búsqueda de un modelo de espacio emergente y para realizar una rápida modelización de una cubierta desplegable. Teniendo este principio básico se podrá hacer la traslación geométrica descriptiva o matemática, la cual conllevará a una serie de propuestas geométricas ([Sánchez, 1992](#), [Berger, 1996](#), [Moraes, 2012](#)).

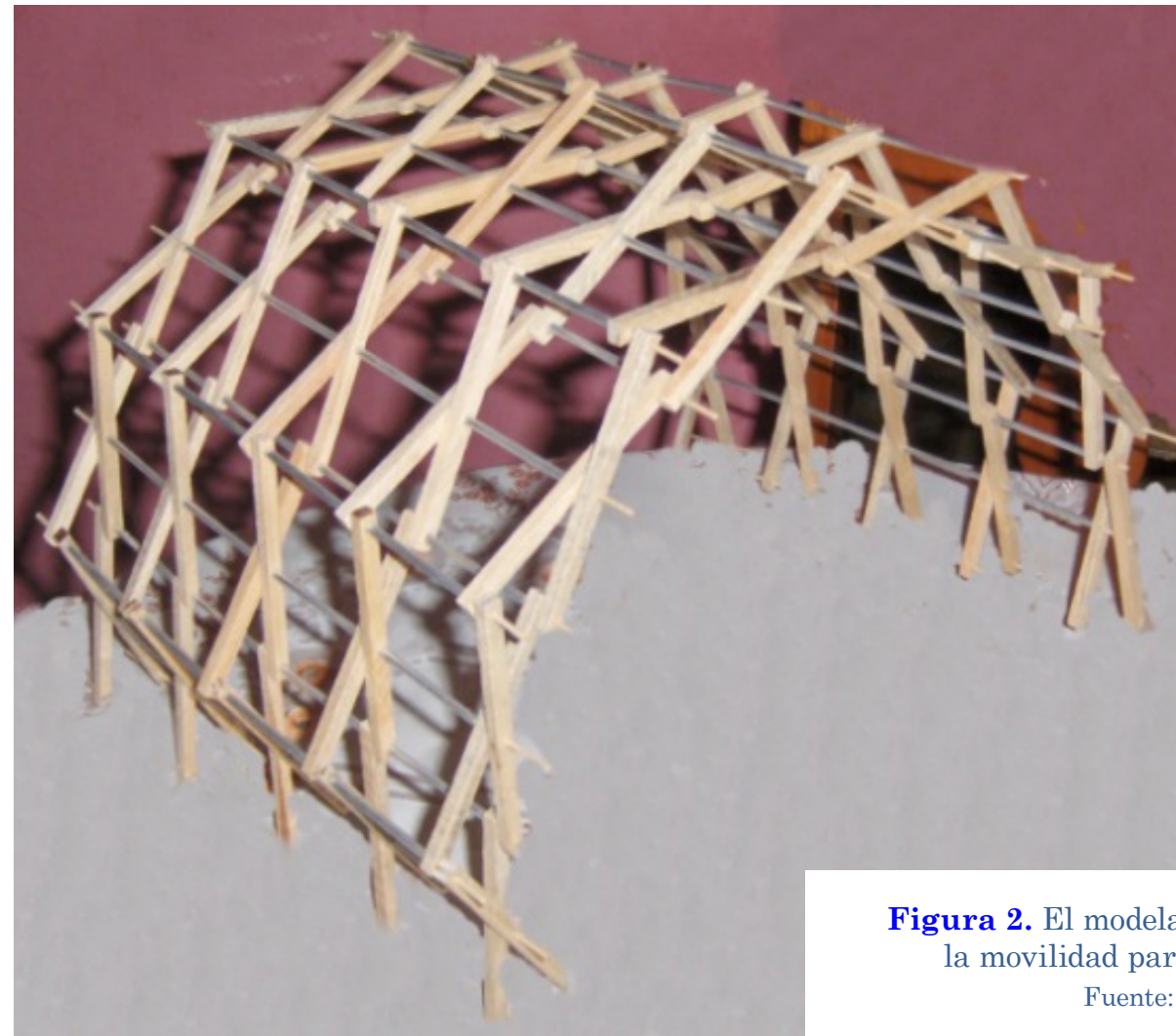


Figura 2. El modelado de las cubiertas sustenta la movilidad para la estructura plegable.
Fuente: [Morales \(2013a\)](#).

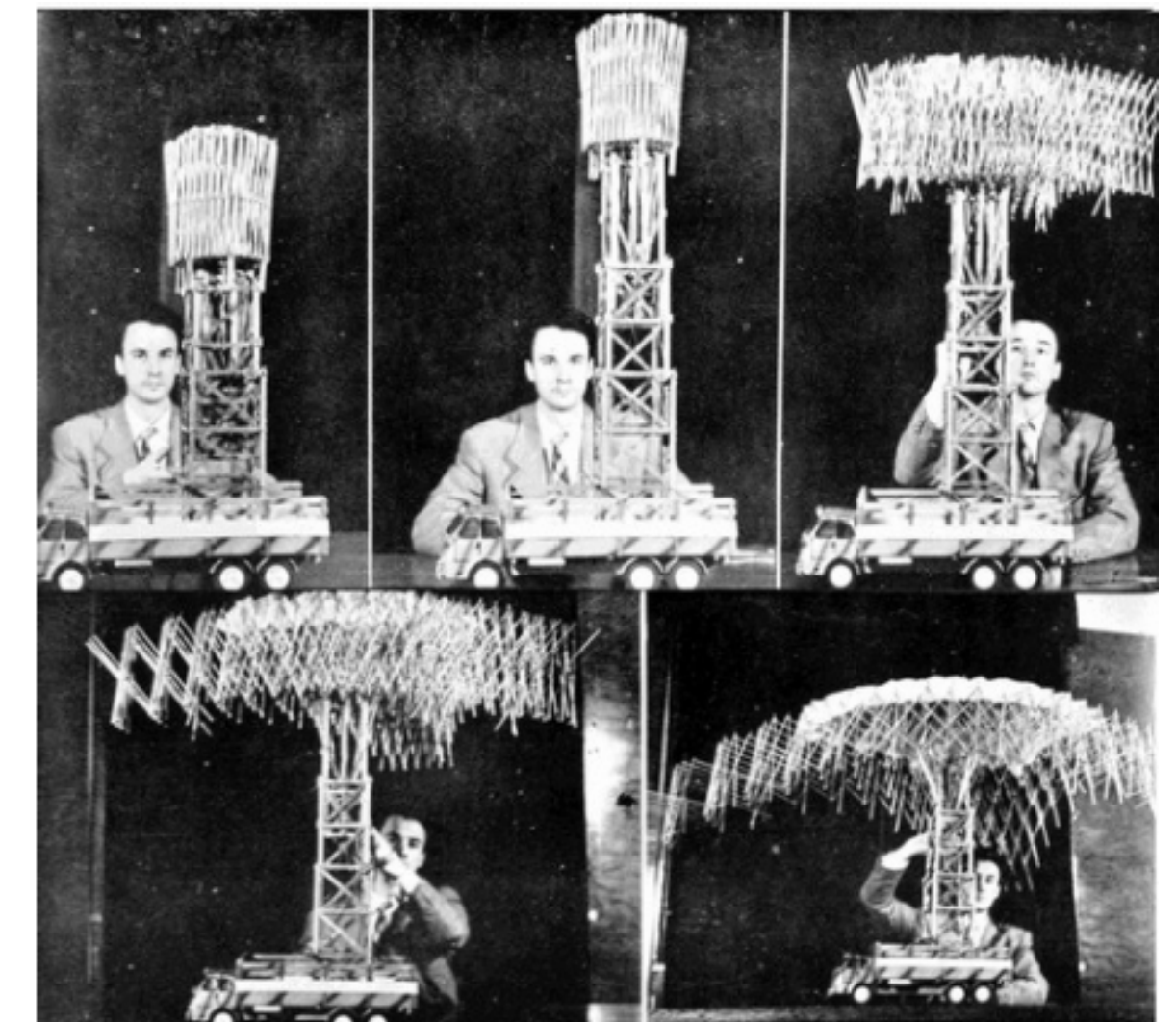
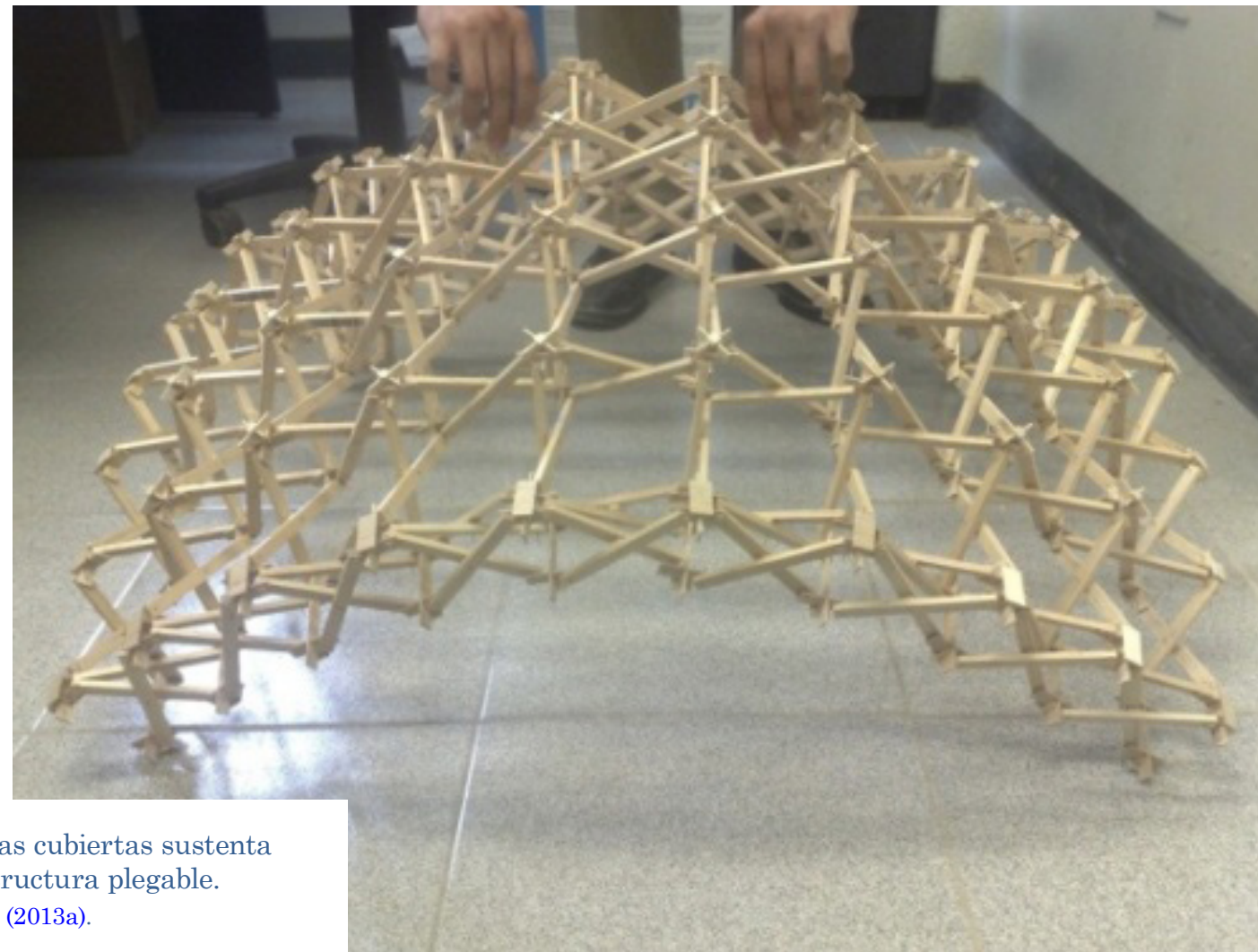


Figura 3. Piñero muestra su prototipo de caparazón desplegable.
Fuente: [Morales \(2019b\)](#).

Para trasladar este tipo de geometrías generaremos una serie de pasos muy sencillos para su desarrollo, en programas como Autocad, Sketchup, Rhino o Solid Work, sin llegar a la programación ya que se buscará sintetizar rápidamente una propuesta de estructura desplegable adecuada a una modulación geométrica. Dicho esto, la

mayoría de las adecuaciones y modelos físico que se desarrollaron provienen de formas cilíndricas o esféricas, esto con el fin de llegar a que el planteamiento geométrico sea sencillo y rápido para generar los modelos de prueba, y con ello ver el movimiento del despliegue en sus piezas ([Figura 2](#)) ([Morales, 2009](#), [Escrig, 1984; 1988](#)).

ANTECEDENTES

A principios de la década de los 60s, el arquitecto español Emilio Pérez Piñero fue pionero en el uso del mecanismo tipo tijera para realizar estructuras desplegables ([Fundación Emilio Pérez Pimero, 2016](#)). Él era de los primeros en aplicar

y emplear el principio del pantógrafo en los tiempos modernos para el uso de configuraciones de estructuras desplegables, su primera obra fue el teatro móvil ([Figura 3](#)). Este modelo en particular consistía en barras rígidas y cables de alambre, los cuales al tensarse bien proporcionan a la estructura la estabilización necesaria.

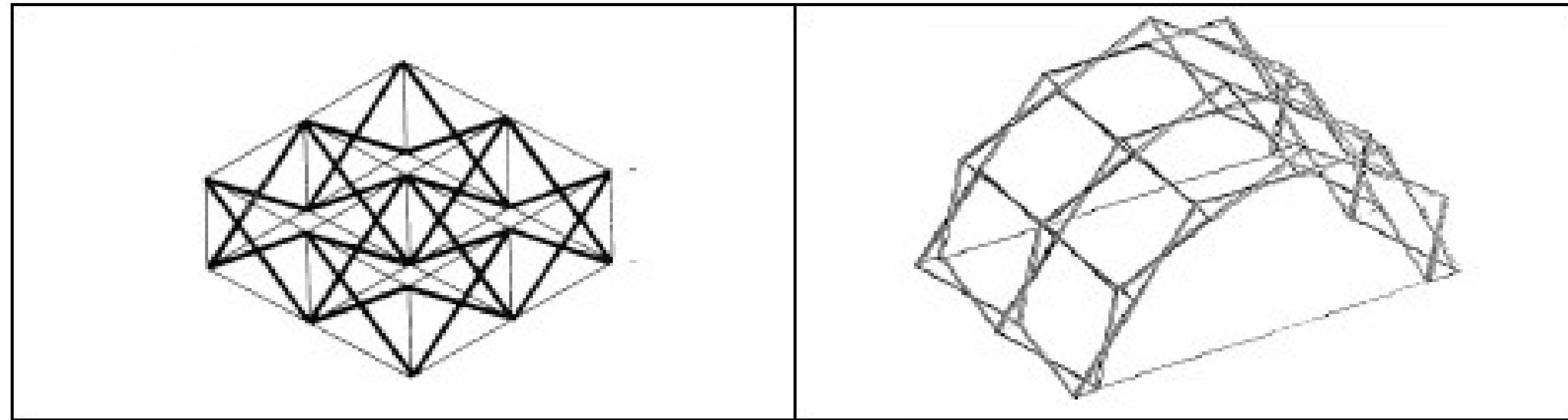


Figura 4. Rejilla bidireccional plana con unidades traslacionales y bóveda de cañón cilíndrica con unidades curvas.

Fuente: [Escrig \(1988\)](#).

Estos miembros permanecen sin estrés en la configuración compacta, incluida en el estado de despliegue. Además, la estructura es libre de estrés durante el despliegue, comportándose efectivamente como un mecanismo estable. Piñero fue muy productivo en el campo de las estructuras de tijera desplegadas, hasta que todo esto llegó a su fin por su trágica muerte en 1972.

Otro arquitecto español se convirtió en uno de los investigadores más prolíficos del mundo de las estructuras plegables. Este fue el Dr. Felix Escrig quien presentó en su disertación la condición geométrica para la implementación de una estructura transformable y demostró cómo se podían obtener estructuras tridimensionales colocando unidades de tijera en múltiples direcciones

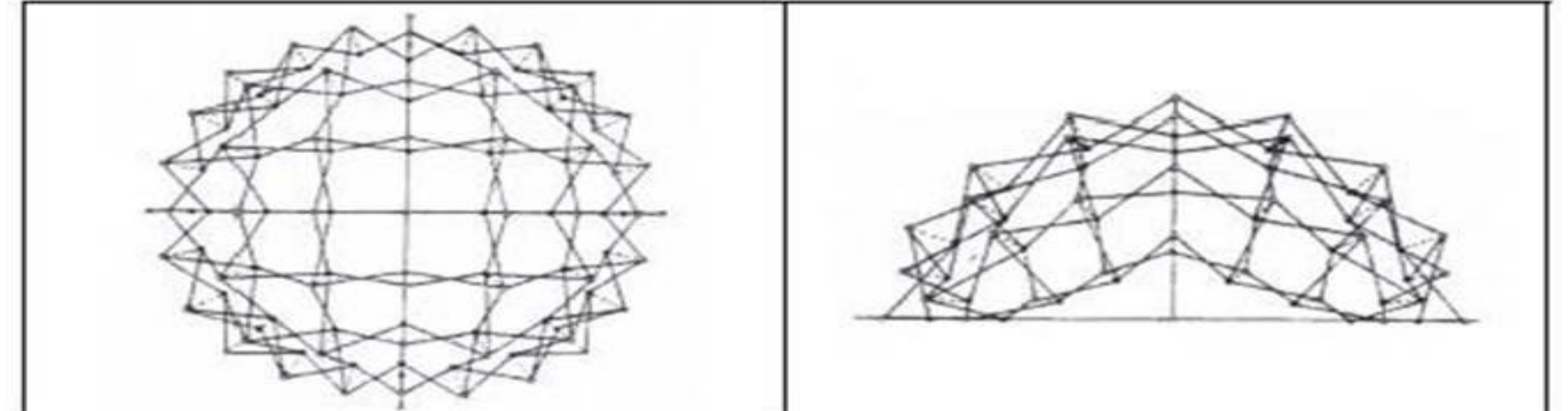


Figura 5. Vista superior y elevación lateral de una rejilla esférica bidireccional con unidades curvas idénticas.

Fuente: [Escrig \(1988\)](#).

dentro de una cuadrícula. También mostró cómo se podría introducir la curvatura en dicha rejilla variando la ubicación de la bisagra intermedia de las unidades de tijera.

Escrig también investigó, en colaboración con Sánchez y Valcarcel, estructuras esféricas de tijera de dos vías basadas en la subdivisión de

la superficie de una esfera ([Escrig, Sánchez y Valcarcel, 1996](#)). Estas cuadrículas de dos vías requieren miembros estabilizadores en las barras transversales o cables que atiranten la estructura para equilibrarse y estabilizar la estructura en su configuración final ([Figura 4; Figura 5](#)) ([Escrig, 2012; Morales, 2009](#)).

METODOLOGÍA

Planteamiento de Diseño

Primeramente, se dará una descripción de las configuraciones posibles para las diferentes disposiciones tridimensionales que podrían llegar a realizarse en las estructuras de tijera compuesta por unidades traslacionales o curvas. Estas pueden diseñarse utilizando diferentes métodos, pero para nuestro caso se realizará con geometría descriptiva como se muestra a continuación.

Para desarrollar las configuraciones posibles de tales estructuras, todas deben de obedecer la capacidad de despliegue de restricción, algunas de las cuales pueden configurarse de manera modular o seriada, Sin embargo, solo una parte de ellos será desplegable sin estrés, lo cual significa que la tijera y los miembros estarán en un estado libre de estrés: las tensiones inducidas por el peso propio quedan a un lado antes, durante y después del despliegue, comportándose efectivamente como un mecanismo (Figura 6). Para entender el concepto hipotético de la investigación, es necesario explicar los enlaces de tijera bidimensionales que obedecen la restricción de despliegue. Un claro ejemplo para desarrollar esta premisa es realizar el análisis geométrico usando medidas compatibles para mantener el espesor estructural y sea constante en toda la estructura,

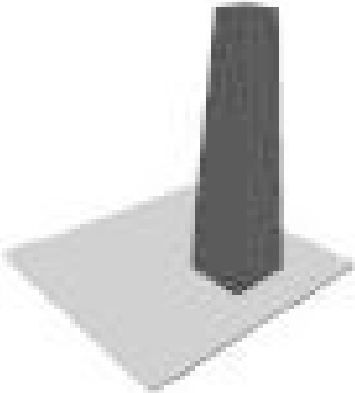
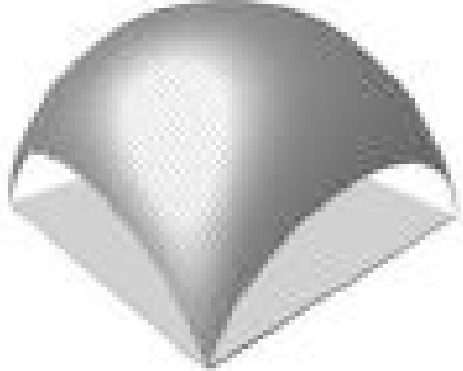
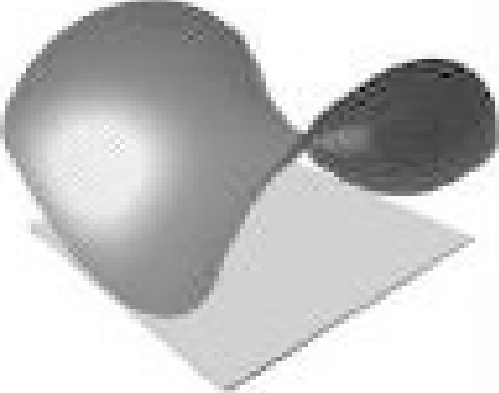
			
			
Linear/Flat	Single curvature	Double curvature	

Figura 6. Formas planas, curvas lineales y de doble curvatura, todas ellas son formas posibles para estructuras desplegables sin estrés tridimensionales y pueden ser diseñados usando las siguientes herramientas descriptivas.

Fuente: Morales (2009).

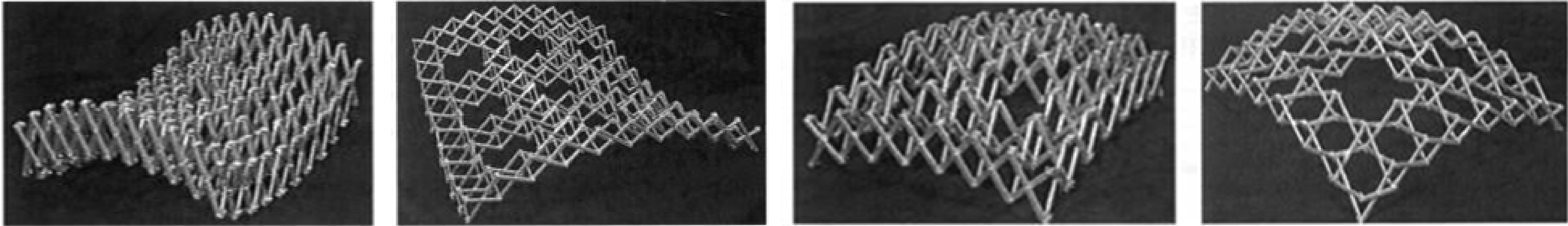


Figura 7. Estructuras de curvatura negativa con unidades traslacionales en dos etapas de despliegue.
Fuente: [Langbecker \(1999\)](#).

por lo que esta configuraciones son siempre desplegables sin estrés ([Figura 7](#)), estas se pueden construirse con curvas positivas o curvas negativas pero dependerá de la complejidad de la figura para aumentar el numero de tijeras en la rejillas del modelo, ya que para obtener la forma de un paquete uniforme tiene que tener

la misma medida de barras en ambos sentidos de la malla geométrica a realizar ([Langbecker, 1999](#); [Morales, 2012](#)).
Para comprende la obtención de la forma de este tipo de estructura ([Figura 8](#)), se elaboró esta tabla que contiene los principios básicos que debe poseer una estructura geométricamente

plegable. Si esto no está contemplado la flexibilidad estructural del sistema no se dará. Teniendo este principio básico se podrá hacer la traslación geométrica matemática o descriptiva de estructura que se experimenta para así generarle una serie de segmentaciones y modulaciones, y así generar la estabilidad dentro

del modelo, ya que sus piezas serán todas iguales dentro de la geometría en un sentido o en ambos, cumpliendo con esto la dirección de la geometría para ser modulada con uno solo tipo de tijeras, lo cual conllevará a una serie de propuestas geométricas para nuestra disertación ([Temmerman, 2007](#); [Morales, 2009](#)).

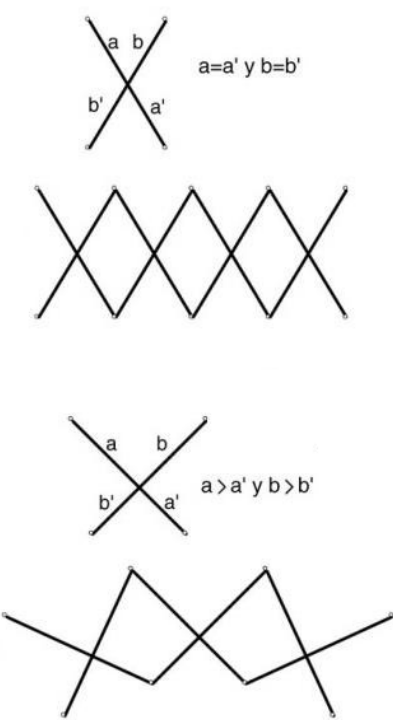
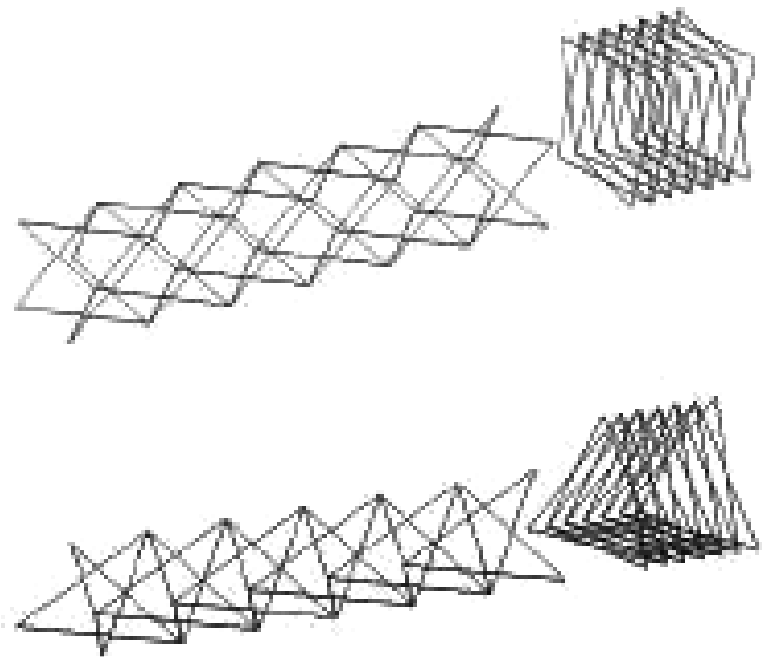
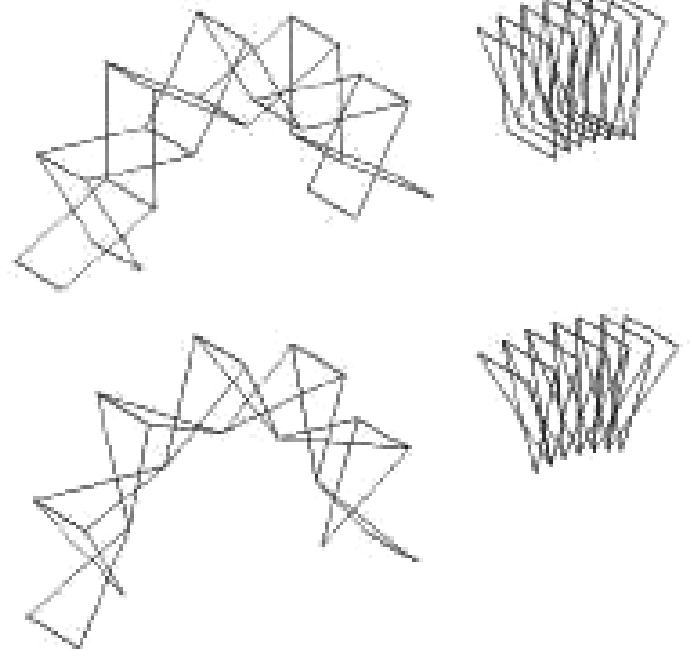
Sistema de Tijera		
Condición Geométrica Básica	Este sistema de tijera es llamado también “Pantógrafo”, el cual se basa en un nudo intermedio pivotante y dos ubicados en los extremos, estos puntos pivotantes tienen total grado de libertad entre dos barras en el eje perpendicular del plano del pantógrafo.	
	Lineal	Curva
		

Figura 8. Clasificación de las cuadrículas de tijera curvadas por separado.
Fuente: Escrig (1988), Morales (2009; 2021b).

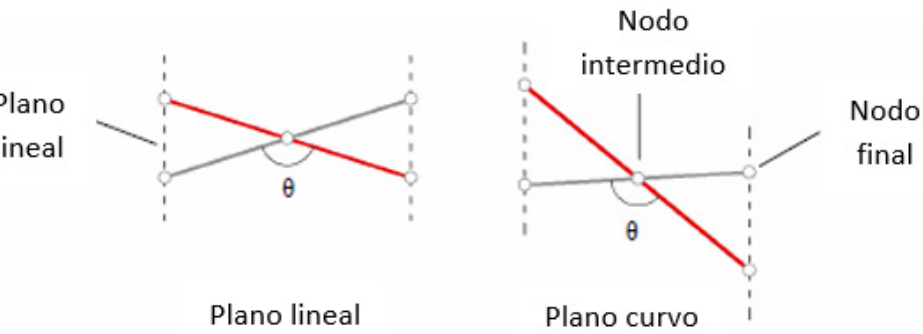


Figura 9. Unidades traslacionales.
Fuente: Morales (2012).

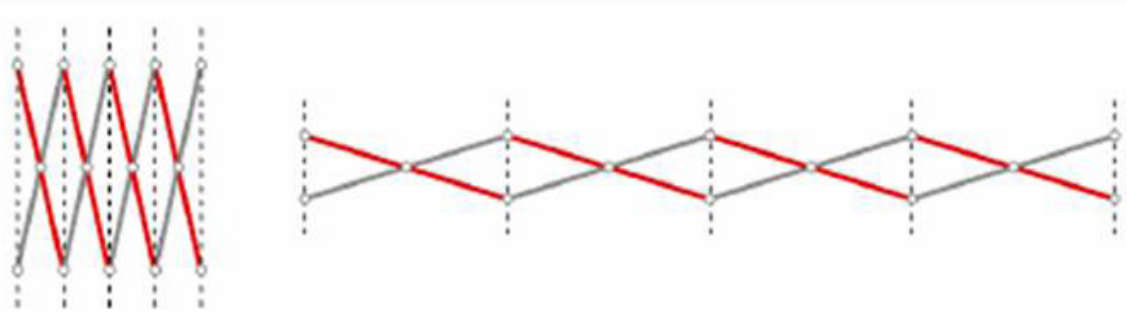


Figura 10. El enlace de tijera tradicional de plano simple, llamado longitud lineal.
Fuente: Morales (2012).

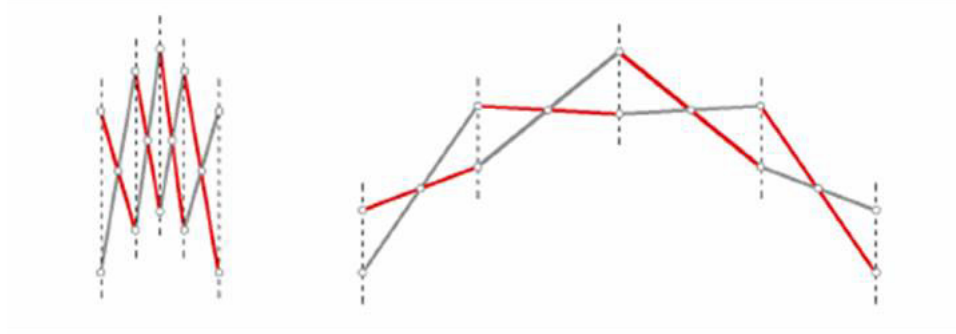


Figura 11. Un enlace de transición curva en su posición desplegada y no desplegada.
Fuente: Morales (2012).

HIPÓTESIS

Para poder desarrollar estructuras plegables definiremos los conceptos de diseño *plegable* y su análisis geométrico el cual usaremos como herramienta para diseñar nuestra forma de construir modelos, y con ellos generar los conceptos de diseño y parámetros que se tendrán que obedecer para configurar una cubierta desplegable.

Concepto de Diseño: Estructuras desplegables basadas en pantógrafos

Las unidades de tijera, también llamadas elementos tipo aspas o elementos pantográficos, consisten en dos barras rectas conectadas a través de una articulación pivotante, llamada bisagra intermedia, permitiendo que las barras pivoteen alrededor de un eje perpendicular a su plano común. Al interconectar

dichos miembros a sus nodos finales usando articulaciones pivotantes, se crea un enlace plegable bidimensional, como se muestra en la **Figura 9**, alterando la ubicación del intermedio de la bisagra o la forma de las barras dando lugar a dos tipos de unidades básicas distintas para desarrollar en esta investigación: unidades lineales y curvas; para este caso buscamos formas modulares que no generen restricciones al despliegue.

Unidades traslacionales Lineales

Los nodos de extremo superior e inferior de una unidad de tijera están conectados por líneas de dicha unidad pivotante. Para una unidad de transición, estas líneas tienen que ser paralelas y permanecer así durante el despliegue.

En la **Figura 9** se muestra un plano y una unidad traslacional lineal. La geometría plana es la unidad de transición más simple que tiene las barras idénticas. Cuando estas unidades están vinculadas, en un conocido grado de libertad de despliegue se forma en el mecanismo plegable, como se muestra en la **Figura 10** (Morales, 2016a).

La unidad de tijera que se genera con medidas de barras diferentes crea desfase en la forma, porque se usa comúnmente para enlaces curvos: —Esta tiene barras de diferente longitud—. Cuando este último está vinculado por sus nodos finales, se forma una unión curva, como se ilustra en la **Figura 11**.

Al variar el ángulo de despliegue (θ), un enlace se transforma de su máxima configuración compacta (un paquete compacto) a su posición completamente desplegada, lo cual se muestra en la [Figura 11](#).

Unidades Curvas

Cuando se encuentra en una transición plana, la bisagra intermedia se aleja del centro de la barra, la unión del pivotante se forma con semi-barras desiguales a y b ([Figura 12](#)). Esta excentricidad de la bisagra intermedia es la que genera la curvatura durante el despliegue.

Las líneas de la unidad se cruzan en un ángulo (γ). Este ángulo puede variar solamente cuando las barras de las tijeras tienen diferentes de tamaño como las formas elípticas, catenarias o parábolas, y es entonces cuando el punto de intersección que se acerca al pivotante se ajusta en la curvatura de la figura. En la [Figura 13](#) se muestra un enlace de unión en su configuración de desplegado y plegado, cuando su forma a desplegar es modular, en este caso media circunferencia ([Escrig, 2012](#); [Morales, 2016b](#)).

Restricción de despliegue

Es crucial para el diseño de estructuras de tijeras desplegables la restricción de la capacidad de despliegue. Esta es una fórmula derivada de [Escrig](#) la cual establece que, para ser

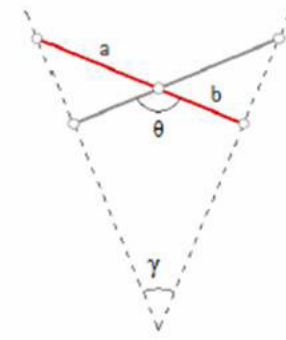


Figura 12. Configuración de aspas curvas.
Fuente: [Morales \(2012\)](#).

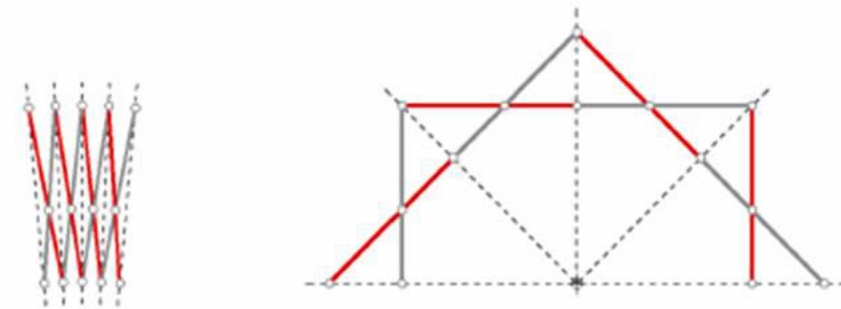


Figura 13. Un enlace curvo modular en su posición de desplegado y plegado.
Fuente: [Morales \(2012\)](#).

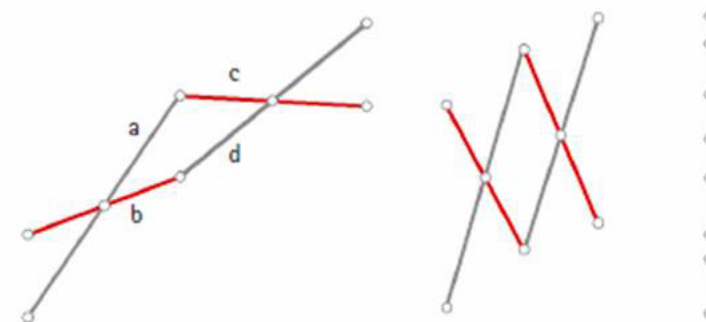


Figura 14. Dibujo en esquemático de restricción de despliegue, en términos de las semi longitudes a , b , c y d de dos contiguas unidades de tijera en tres etapas de despliegue consecutivas.
Fuente: [Morales \(2012\)](#).

desplegable, la suma de las semi-longitudes a y b de una unidad de tijera tiene que ser igual a la suma de las semi-longitudes c y d de la unidad contigua. Esto se traduce teóricamente en la capacidad de las barras para coincidir en el estado compacto.

Prácticamente, esto significa que el enlace de tijera se puede plegar en un paquete compacto de barras. Para el enlace en la [Figura 14](#), la restricción de despliegue está escrita como (1):

$$a + b = c + d \quad (1)$$

Cabe señalar que los enlaces de tijera que no cumplen con la Ecuación (1) no pueden ser parcialmente plegable: la unidad puede estar completamente compactada, mientras que la unidad contigua aún podría estar parcialmente desplegada. Sin embargo, desde esta disertación la preocupación por el diseño de estructuras de tijera debería ser completamente plegable, la restricción de despliegue se trata como un requisito mínimo ([Escrig, 1988](#); [Escrig, 2012](#); [Morales, 2012](#); [Morales, 2014](#)).

Desarrollo Geométrico Unidireccional Simplificado

Se realizó por medio de un método geométrico descriptivo la siguiente geometría

generada de las condiciones explicadas anteriormente. Para el primer análisis, se utilizará la circunferencia como forma rectora de la figura traslacional de este modelo experimental, la cual ayudara a modular los miembros plegables de cada geometría propuesta en esta adecuación.

Para esto, se dibuja una circunferencia de guía para aplicar dicha traslación (por el momento solo se analizará el ajuste de la forma traslacional a la geometría), después de colocar el círculo, se trazan dos líneas rectoras que inician del punto “O” de origen y se forma la circunferencia, posteriormente se traza una línea como referencia tanto horizontal como vertical en ambas coordenadas X y Y . Estas líneas ayudan a generar las líneas de segmentación del círculo formando puntos de referencia los cuales se utilizan para las divisiones modulares del círculo, en donde se delinearán las figuras geométricas de las tijeras. El proceso genera secciones que se replican varias veces y crean una serie de armaduras de aspas formando el cuerpo geométrico de la estructura, y a su vez ([Figura 15](#); [Figura 16](#)), se unen por medio de líneas que simulan los arrostramientos y ligaduras, pero que nace a partir de una geometría traslacional. Este aditamento establecerá un mayor equilibrio geométrico a los futuros modelos físicos experimentales que se desarrollaran ([Morales, 2017](#); [Morales, 2018](#)).

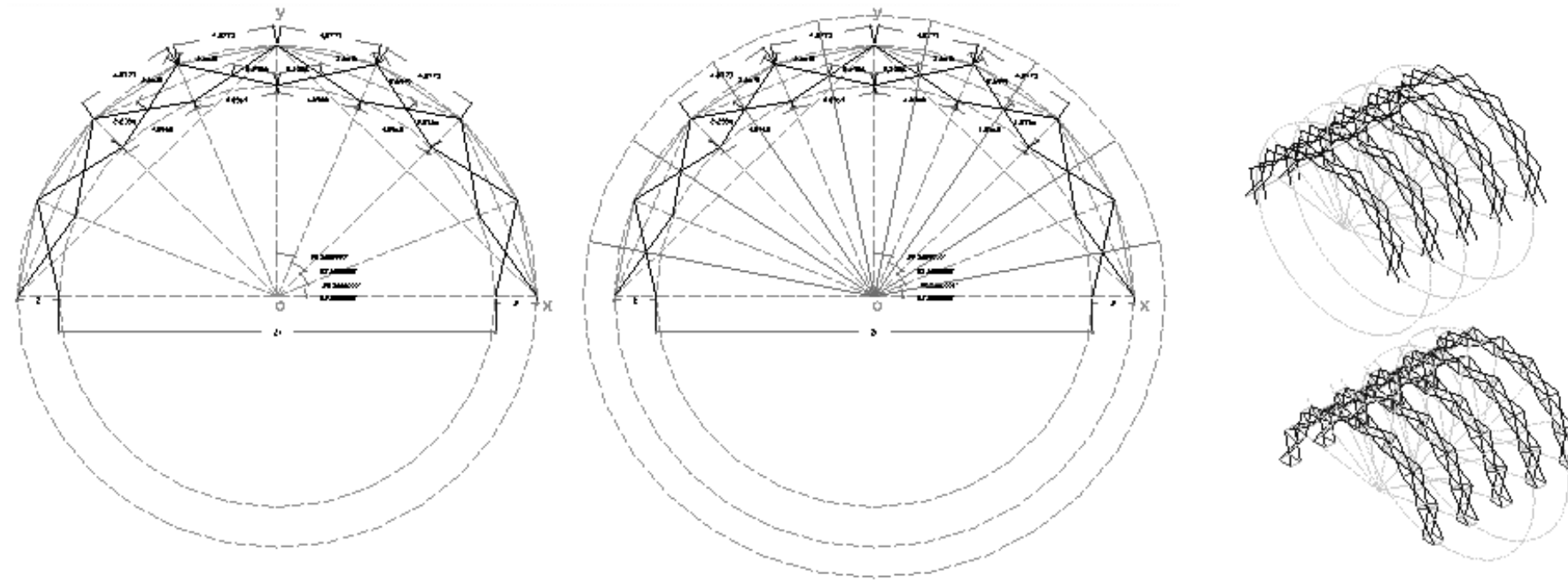


Figura 15. En la primera imagen se desarrolló de una adecuación geométrica simplificada, generadora de formas y miembros modulares para su estandarización, en la segunda imagen se colocan la configuración geométrica en una forma lineal para desarrollar una forma cilíndrica.

Fuente: Fotos experimentales (Morales, 2009).

Construcción del Prototipo Experimental Unidireccional

En consecuencia, se desarrolla la primera prueba de modelización de la adecuación geométrica ya desarrollada anteriormente, por lo cual se pasará a la etapa experimental constructiva del modelo en donde se realizara un prototipo de un sistema plegable de tijeras a una escala 1:4, donde

los miembros del modelo son tubos de acero galvanizado de 3/4", estos cubrirán una longitud de 9 m por 3.5 m en la sección transversal, con una altura de 2.8 m, por lo cual se procedió a realizar la manufactura de dicho modelo en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Veracruzana. En el momento que se cortó los miembros del sistema se armó cada pieza, y se unieron las barras que conformarían las tijeras (Figura 17), para

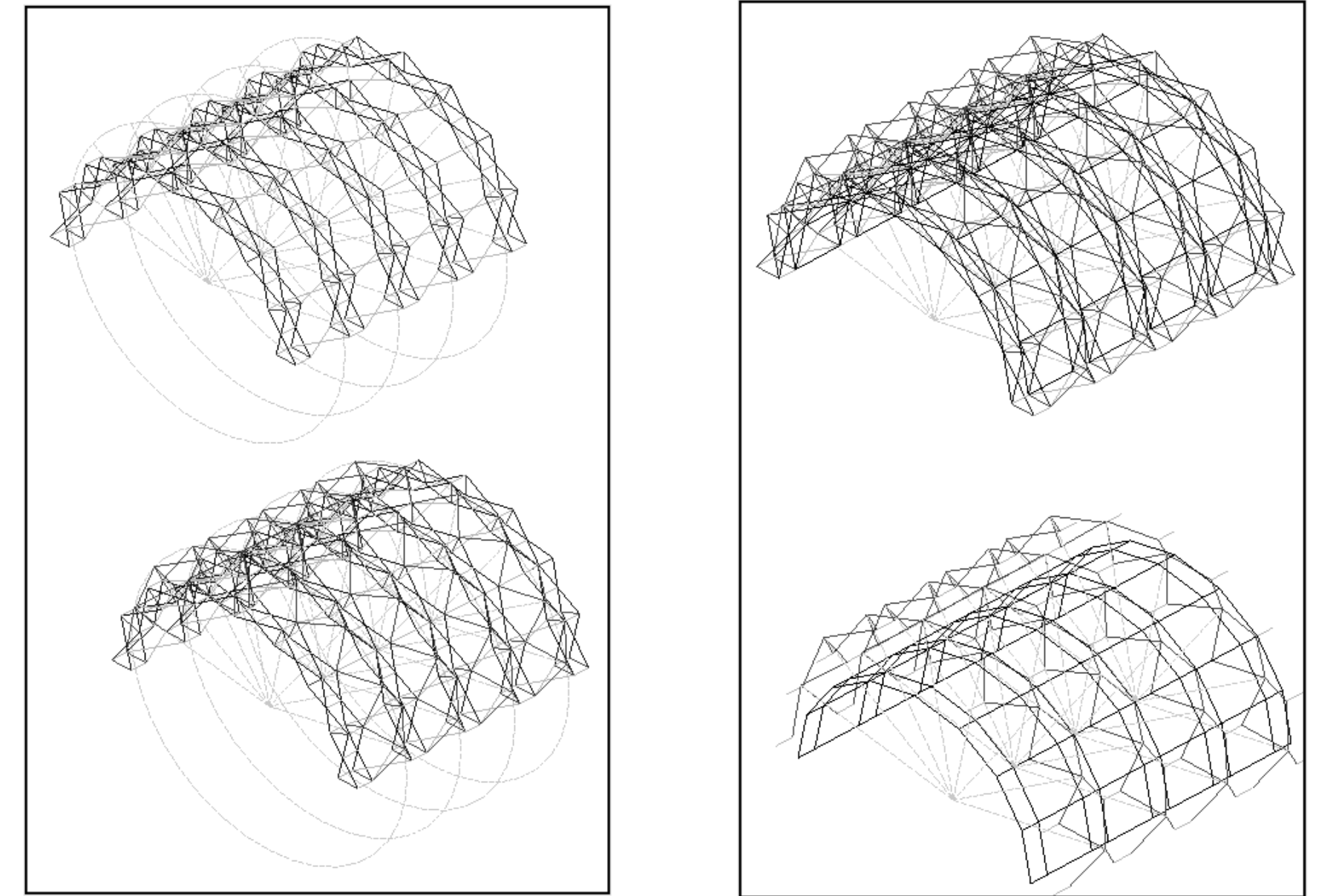


Figura 16. En la primera imagen se unen las curvas plegables con asas lineales, en la segunda imagen se coloca arrostramiento plegable en las cuadrículas, generando la forma cilíndrica final plegable.

Fuente: Fotos experimentales (Morales, 2009; Morales, 2014).



esto se necesitaron las tuercas y las rondanas de acero galvanizado; con ellos se unieron las barras para formar las aspas articuladas y, de igual manera, se conectaron los arriostramientos verticales (para este primer armado se tuvieron que colocar barras verticales para inmovilizar la estructura plegable, lo cual se complicó por no tener las herramientas necesarias para taladrar las uniones

de forma correcta, así que se colocaron para tener mayor precisión en las uniones y no complicar el despliegue de la estructura). Se marcaron los tubos que sirvieron como atiesadores verticales a una medida de 0.92 m de largo ayudando a que no se plegara la estructura, y así se pudo obtener la primera guía para hacer el módulo (Morales, 2019a).



Se continua con el armado de las barras en forma de tijera generando los módulos plegables, los atiesadores verticales mantienen unidos los módulos hasta generar la forma geométrica adecuada. Posteriormente se colocaron los arriostramientos plegables que

formarían los elementos para ayudar a equilibrar y estabilizar la forma final de nuestro modulo (Figura 18), ya que en este prototipo sus arriostramientos también se pliegan junto con las tijeras colocadas en ambas direcciones (X y Y).



Figura 19. Armado de los dos semi-arcos y verificación de la geometría.
Fuente: Fotos experimentales (Morales 2014).



Figuras 20. Primer arco terminado del prototipo.
Fuente: Fotos experimentales (Morales, 2014).

Siguiendo con el proceso de la construcción de la estructura plegable, se obtuvo la mitad de la sección del arco plegable (Figura 19a). Una vez obtenida la forma, la otra mitad se armó de

manera más rápida, de acuerdo con lo que ya se conocía de dicho método constructivo (Figura 19b; Figura 19c), ya que esto se aseguraría el armado completo del primer arco de la estructura.

Posteriormente se unieron ambas partes del armado y se obtuvo el resultado esperado de la geometría diseñada anteriormente. En la Figura 20 podemos ver como se pudo obtener la geometría deseada, con lo cual se procedería a

repetir el proceso en las siguientes conexiones de arco, pero ya sin los atiesadores verticales temporales, al tener una medida estándar establecida para realizar bien las conexiones (Fuller, 2000; Morales, 2021a).



Figura 21. Se realiza el segundo bloque de arco para la estructura plegable.
Fuente: Fotos experimentales (Morales, 2014).

El siguiente paso de la construcción de la cubierta plegable, es el segundo arco que se pudo desarrollar más rápido, gracias a que el método constructivo anterior sirvió para estandarizar las perforaciones de los tubos y así dar con igual número de conexiones en las barras (Figura 21).

Para comprobar que los módulos de tijera plegable de la estructura estaban conectados adecuadamente, se realiza un despliegue de prueba para verificar si no existe algún error de geometría o alguna restricción que impida el despliegue correcto de la cubierta (Figura 22); en el proce-



Figura 22. Verificación del despliegue de la estructura plegable.
Fuente: Fotos experimentales (Morales, 2014).

so del despliegue se observa que la estructura pliega correctamente y no existe ninguna deformación del material ni de la geometría, por cual esta pasa la prueba y se procede a conectar los siguientes módulos de arcos plegables.

Por último, se finaliza el modelo completo, ajustado a la geometría plegable de la adecuación anterior. Para este caso se realizará un empaquetado plegable de toda la cubierta, por ello salieron dos tipos de nodos (Figura 23), los cuales



Figura 23. La primera imagen del nodo central que une todas las barras de la cubierta plegable, y la segunda imagen del nodo que une las barras de arrostramiento plegable.
Fuente: [Morales \(2014\)](#).

estandarizaron constructivamente esta propuesta. Teniendo en cuenta este modelo, se resuelve la hipótesis de traslaciones geométricas sencillas para desarrollar la rapidez de los prototipados de

las estructuras plegables y así realizar proyectos tecnológicos de este tipo de sistemas con mayor frecuencia en la arquitectura ([Figura 24](#)) ([De Llorens, 2015](#); [Morales, 2021b](#)).



Figura 24. Verificación del despliegue de la estructura plegable completa.
Fuente: Fotos Experimentales ([Morales, 2014](#)).

*Desarrollo Geométrico
Bidireccional Simplificado*

Siguiendo la metodología de simplificación geométrica para este proceso geométrico se

empleo específicamente en el método del Dr. Escrig, el cual analiza cubiertas curvas bidireccionales a partir de un punto central radial ([Figura 25](#)), el cual en nuestro caso es una forma

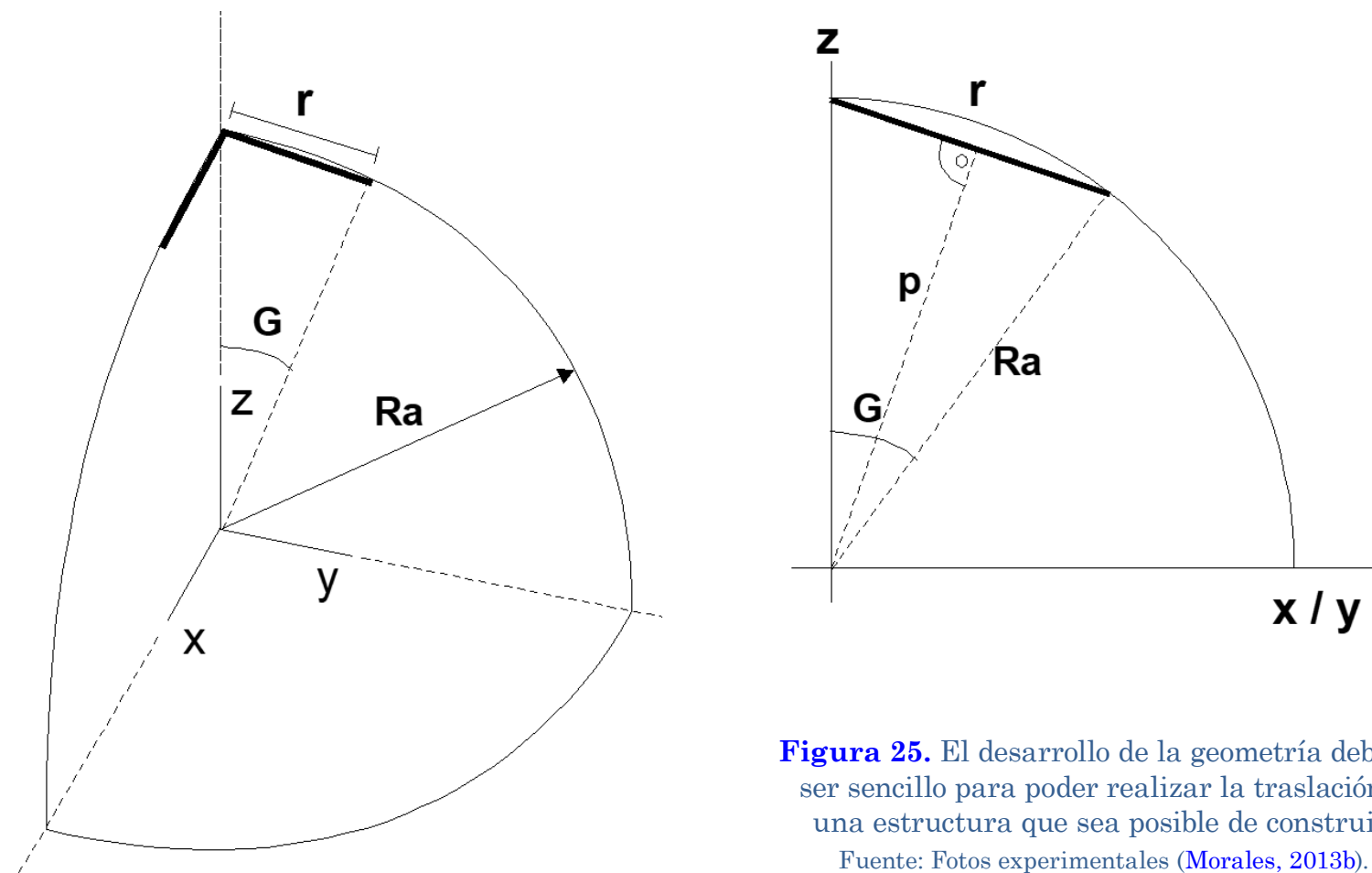


Figura 25. El desarrollo de la geometría debería ser sencillo para poder realizar la traslación a una estructura que sea posible de construir.
Fuente: Fotos experimentales (Morales, 2013b).

esférica. A partir de allí, se van disponiendo las barras de lados iguales hasta alcanzar el número de módulos deseado, planteando una geometría hecha a ejes de las piezas para dimensionar sus componentes y sus nudos de la forma adecuada (Escrig, 1984).

Si se llama **Ra** al radio de la cúpula y r al lado constante de la malla base, a partir de éstos es fácil determinar el ángulo de cobertura correspondiente **G**. Repitiendo este sobre los círculos máximos contenidos en los planos coordenados **yz**

y **xz** obtenemos de modo inmediato los vértices de la retícula para estos planos.

Los puntos que entrañan mayor dificultad serán los intermedios. Para hallarlos (Figura 26), geoméricamente bastaría con trazar a partir de dos puntos conocidos e inmediatos; al buscar dos circunferencias sobre la esfera encontraríamos el centro en estos puntos y con radio **r**. La intersección de estas circunferencias daría dos puntos, uno ya conocido, y el otro sería el punto buscado (Escrig, 1988).

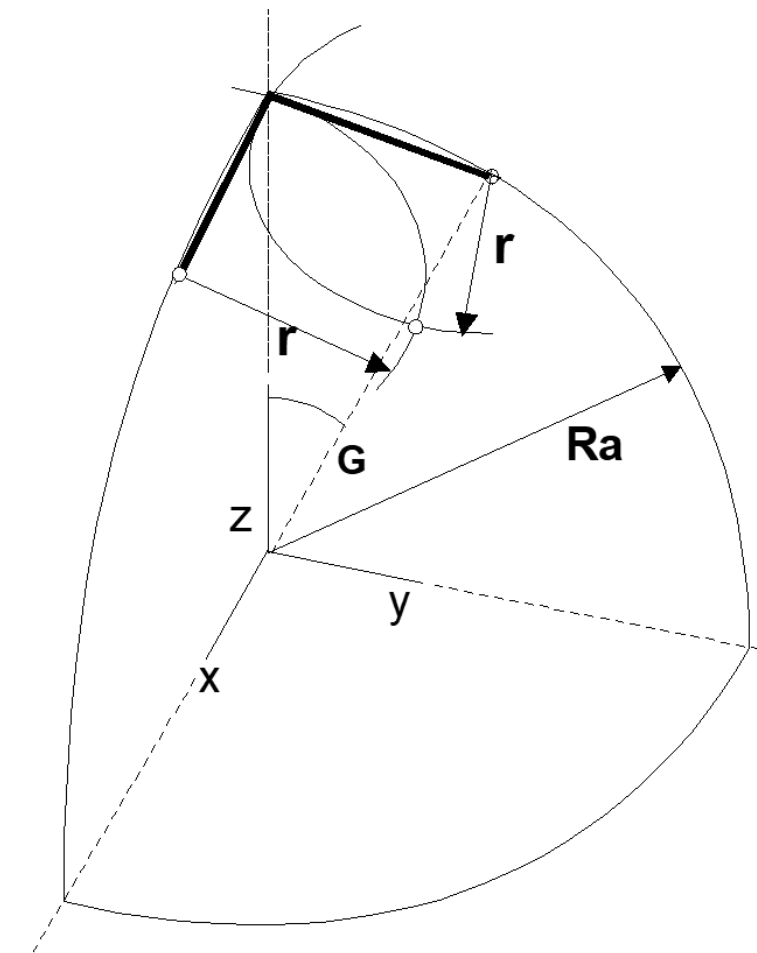


Figura 26. El siguiente paso importante para que sea modular dicha geometría, es encontrar la intersección del punto de unión, con la siguiente plegadura ya que con ellos se repetirá el mismo movimiento para todas las “X”, de la geometría.
Fuente: Fotos experimentales (Morales, 2013b).

Geoméricamente, este desarrollo se traduce en hallar la intersección de tres esferas en el espacio: la esfera principal, de radio **Ra** y dos pequeñas de radio **r**. Se repite este proceso sucesivamente hasta completar el tamaño de la malla deseada.

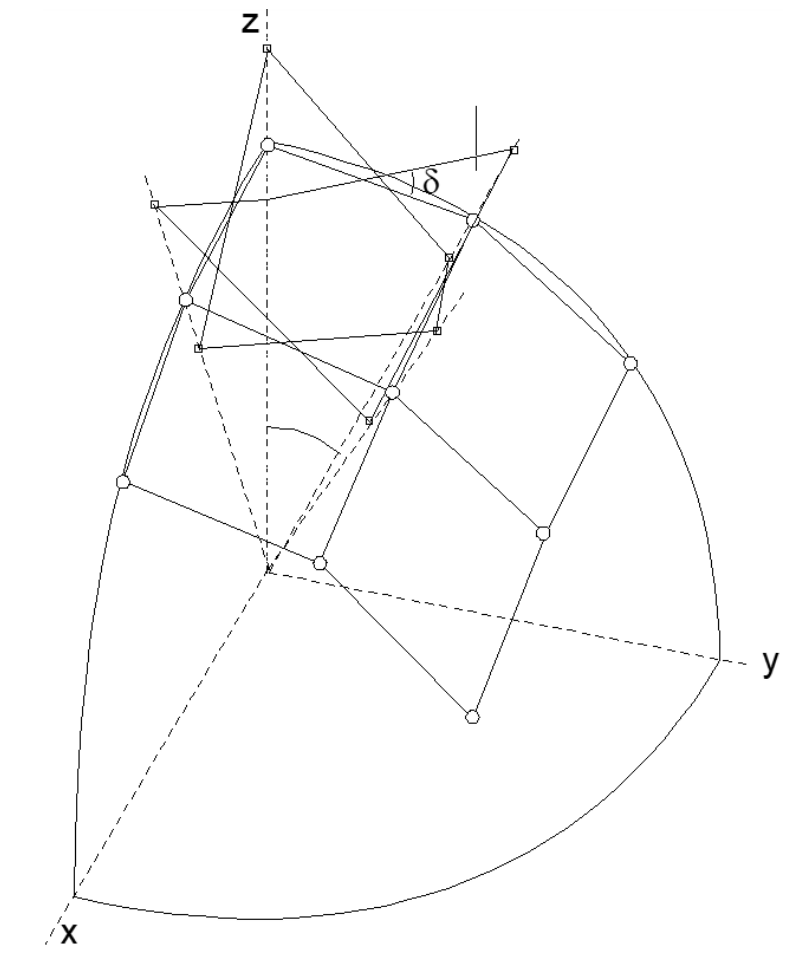


Figura 27. En consecuencia, se desarrollo y se localizaron los rombos de unión que ayudara a servir de ejes para construir la cubierta plegable.
Fuente: Fotos experimentales (Morales, 2013b).

Este proceso nos garantiza efectivamente que todos los lados tienen la misma dimensión, pero presenta el inconveniente de que a medida que se aleja del polo y de los planos coordenados, los cuadrados se van deformando cada vez más (Figura 27), dan lugar a rombos pronunciados, lo cual no resulta demasiado estético (Escrig, 1984).

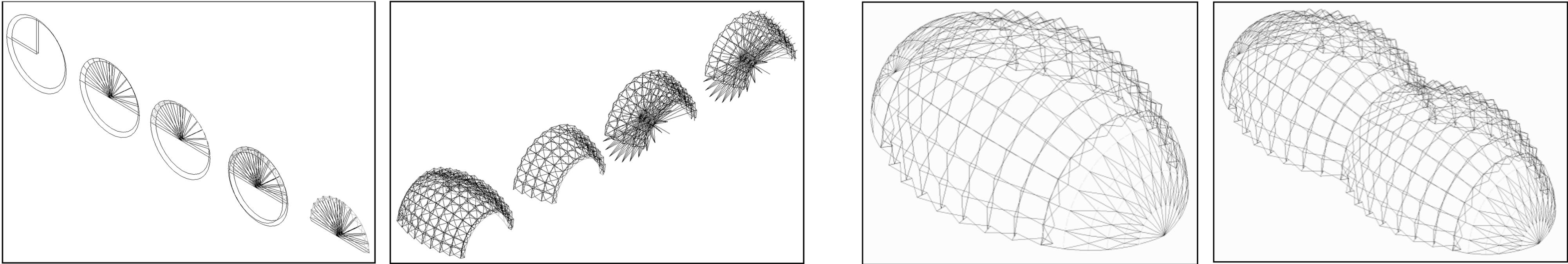


Figura 28. La generación de la adecuación geométrica nos deja un panorama de cómo será el desarrollo del modelo, y cómo se puede combinar con diferentes segmentos.
Fuente: Fotos experimentales (Morales, 2009).

Ya encontrados los puntos de partida de todo el desarrollo, se genera la cúpula de manera muy rápida por la modulación del modelo (Figura 28), lo cual se desarrolla en el punto de origen generando una línea de referencia en los planos

Z, para formar los puntos de intersección de la cúpula, y posteriormente se replica con los diferentes ángulos de encuentros, que servirán de referencia para colocar los puntos de unión de los arrostramientos.

Ya concluido el proceso de modelación geométrico, el resultando da a una estructura plegable cilíndrica hecha por dos círculos circunscritos de dos radios diferentes que forman la figura final. Consecutivamente se realizan

las diferentes formas de su geometría, lo cual brindará los medios de conexiones de la estructura y diferentes iteraciones que puede tener el modelo (Figura 28) (Morales, 2009; 2016a).



Figura 29. Se muestra las fases de manufactura del modelo bidireccional de la cubierta plegable, y se verifica su despliegue plegable.
Fuente: Fotos experimentales (Morales, 2014).

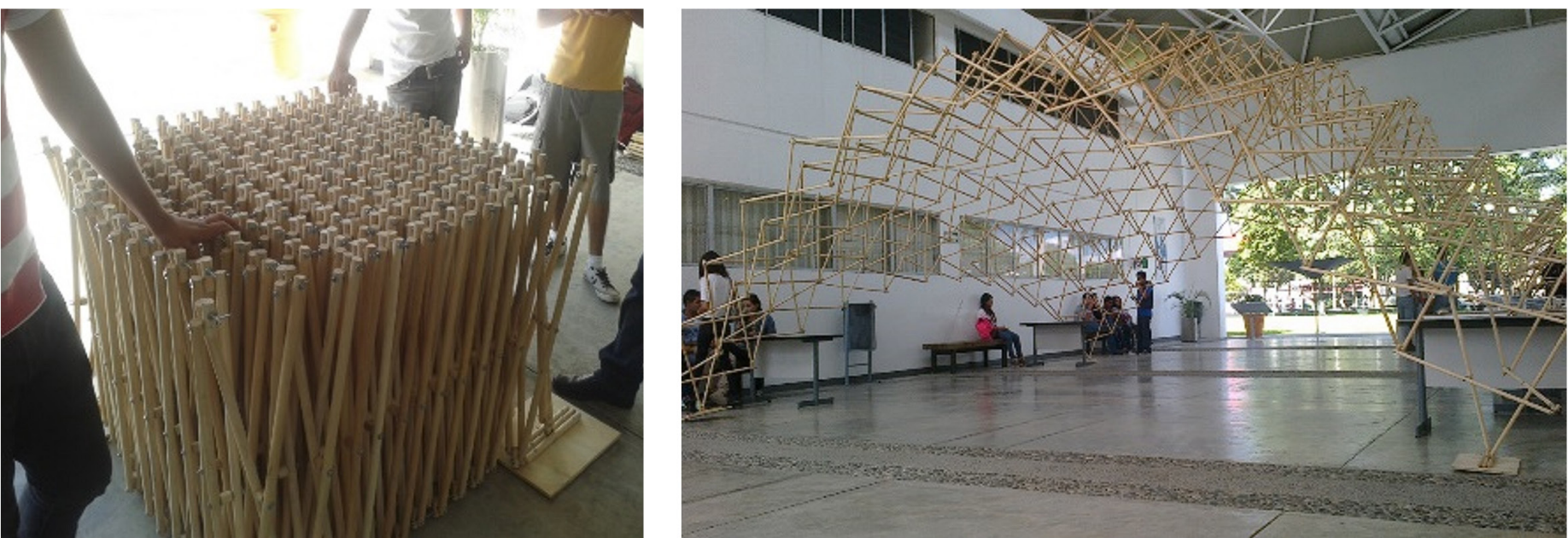


Figura 30. La generación de la adecuación geométrica nos ayuda a desarrollar rápidamente modelos que podemos verificar en su despliegue.
Fuente: Fotos experimentales (Morales, 2014).

*Construcción del Prototipo
Experimental Bidireccional*

Se desarrolla la segunda prueba de modelización de la adecuación geométrica ya desarrollada anteriormente y se pasa a la etapa experimental constructiva del modelo en donde se realiza un prototipo de un sistema plegable de tijeras a una escala 1:3, donde los miembros

del modelo son poste de madera de 3/4”, cubriendo 10 m en la sección longitudinal y 10 m en la sección transversal, con una altura máxima de 5 m, por lo cual se procedió a realizar la manufactura de dicho modelo para cubrir un evento académico en Vicerrectoría de la Universidad Veracruzana (México). Esta manufactura se logró en menos tiempo por ya tener la experiencia anterior de como cortar los miembros del

sistema plegable y poder armar de manera más eficiente cada pieza; razón por lo cual el sistema de las barras que conformarían las tijeras se realizó con un solo nodo estándar, necesitando tuercas y rondanas de acero galvanizado, para con ello unir los miembros para formar las aspas articuladas; esta modelización culminó con

una cubierta bidireccional plegable. Aunque la cubierta final pudo desplegarse y mantenerse en equilibrio con varios módulos (Figura 29; Figura 30), se tuvo problemas con las barras de madera, al romperse fácilmente con el paso del tiempo, ya que no aguantan mucho la intemperie (Morales, 2014).



Figura 31. Las primeras dos imágenes muestran los dos nodos estándar que se realizaron para el modelo, las dos últimas imágenes el armado de los módulos de la cubierta.
Fuente: Fotos experimentales (Morales, 2014).



Figura 32. verificación del desplegado de la cubierta bidireccional.
Fuente: Fotos experimentales (Morales, 2014).

Por la facilidad de manufactura del modelo anterior se construye una variante de la cubierta bidireccional con una esfera rebajada, con tubos de acero galvanizado de $\frac{3}{4}$ ", por lo

que se construyó una cubierta bidireccional a escala 1:8, en donde se verificaron sus uniones y despliegue como en el modelo anterior, el cual se pudo fabricar más rápidamente por la

estandarización de sus miembros, y así realizar un estudio más detallado de la cubierta plegable, el cual cubre un área 35 m². Por estas razones salieron dos tipos de nodos (Figura 31a), estandarizados constructivamente a la propuesta: el primer nodo es para unir sus aspas plegables y el segundo para unir sus arrostramientos horizontales, teniendo en cuenta que este modelo tiene cierta ines-

tabilidad a la hora del despliegue, por lo que posteriormente se ejecuta una verificación de despliegue, y para este caso se realiza un empaquetado plegable, que se armara bloque por bloque para que no haya un error de restricción (Figura 31b) (Morales, 2021a). En consecuencia, se arma todo el empaquetado de la cubierta y despliega para cotejar su geometría (Figura 32), y ver que sea estable,



Figura 33. Refuerzo de arrostros horizontales en la cubierta plegable.
Fuente: Fotos experimentales (Morales, 2014).

pero debido a la forma necesita de anclajes en su base para evitar esa deformación geométrica, por ello se coloca una barra de arrostros horizontales en los módulos, la cual hace que se mantenga en equilibrio y no se deforme la geometría desarrollada anteriormente (Figura 33). Con ello logramos desarrollar otro modelo experimental constructivo con una simplificación geométrica, en las barras de sus ejes y sus nudos, consiguiendo que el modelo sea modular (Morales, 2022).

RESULTADOS

El resultado de toda la metodología anterior, fue generar un desarrollo geométrico simplificado modulando las barras en sus ejes y sus nudos, lo cual ayudo a que la geometría tuviera una modulación de miembros. Esta característica socorre en gran medida a mejorar ciertos criterios de diseño para los siguientes proyectos que se realizaron, en otras investigaciones. Dichas geometrías se vieron reflejadas en la construc-



Figura 34. Propuestas para el Ayuntamiento para rescate de espacios públicos desarrollados por vinculación con el Laboratorio de Estructuras.
Fuente: Morales (2021b).

ción de los modelos anteriores, donde se diseñó un modelo que no tuviera tantas excentricidades por medio de uniones sencillas. Sin embargo, el logro de crear un modelo a escala 1:3, 1:4 y 1:8, dio la pauta de cuáles serían los inconvenientes en estos sistemas, y así tratar de subsanar el problema a tiempo para poder fabricar dichos prototipos con mucha mayor funcionalidad constructiva, por lo que el alcance de la traslación geométrica ayuda mucho a configurar las modelizaciones con el menor número de fallas de excentricidades en la uniones para así manufacturar la sencillez de su armado y posteriormente hacer una verificación de despliegue, con la idea de obtener mejores resultados en la movilidad y no haya tanto desfase excéntrico en sus conexiones de armado con los miembros de la cubierta (De Llorens, 2011).

En consecuencia, se creó una cubierta plegable traslacional, la cual puede cumplir con espacios emergentes temporales y modularse de varias maneras, no necesariamente de una. Para el alcance de esta disertación se genera una propuesta arquitectónica de un proyecto de cubierta plegable para el Parque Juárez del ayuntamiento de la ciudad de Poza Rica en Veracruz (México). El prototipo con el cual se diseñó fue con una cubierta bidireccional, por los requerimientos de una techumbre rápida y que cubriera muy rápido 1 600 m², por lo que la propuesta fue bien recibida y se están generando los prototipos de uniones que puedan llegar a tener la cubierta, para crear diferentes posibilidades de montaje (Figura 34); el fin de este trabajo es solo proponer la facilidad de cómo desarrollar los modelos plegables con una simplificación geométrica para estandarizar los miembros y uniones (Morales, 2019a; 2021b).

DISCUSIÓN

La investigación de las estructuras desplegadas en la última década ha ido en aumento por el crecimiento de fenómenos naturales catastróficos y el cambio de las necesidades humanas en el espacio arquitectónico que han caducado, por lo cual hay una necesidad cambiante y variable de los requerimientos de diseño en la arquitectura, en el tema de las estructuras plegables uno de los pioneros que nos deja la pauta para desarrollar dichas geometrías es el arquitecto Emilio Pérez Piñero y el Dr. Félix Escrig, implementando transiciones geométricas a modelos manufacturables, en los cuales con la aparición de programas informáticos podemos efectuar las adecuaciones geométricas más complejas, realizarse con una amplia programación matemática, y determinar formas muy variadas y complicadas, pero la problemática siempre es la misma, una geometrización que facilite y estandarice las barras y los nudos, ayudando a que la transición de estas estructuras plegables sea más rápida y poder trabajar en sus desventajas, las conexiones.

En la investigación del Dr. Félix Escrig, tiene una variada aplicación tanto en el ámbito de espacios emergentes como aeroespaciales, al generar estructuras con materiales de alta resistencia y bajo peso. Por todo lo anterior aprendemos que podemos desarrollar más modelos simétricos y asimétricos en las estructuras plegables, ya que las diferentes hipótesis para estabilizar los modelos plegables pueden ir mejorando dependiendo de los ensayos físicos de utilidad y restricción de las cubiertas, por lo cual nos deja varias líneas de

investigación que se puede combinar con otros sistemas estructurales y materiales.

Por último, el resultado de toda esta metodología anteriormente descrita podrá ayudar a generar una geometrización de una cubierta plegable de una forma más sencilla, cumpliendo con los parámetros tipológicos de diseño geométrico traslacionales plegables ([Morales, 2009; 2022](#)).

CONCLUSIONES

El estudio de esta investigación se basó desde el principio en la metodología de diseño del arquitecto Emilio Pérez Piñero y el Dr. Félix Escrig, como punto de partida para el diseño de una geometría simple y estandarizada de barras, ejes y nudos, ya que ellos desarrollaron sistemas geométricos que ayudaron a generar cubiertas plegables más fáciles de manufacturar y rápidos de montar en sitio.

Sin embargo, esta disertación se centró en las hipótesis de geometrías traslacionales para desarrollar un sistema plegable, como factor importante para crear las primeras aproximaciones conceptuales de los modelos y sus adecuaciones, donde se expuso el desarrollo geométrico y su viabilidad para generar rápidamente un modelo. En consecuencia se propuso un desarrollo geométrico simplificado el cual derivó de los rasgos principales del método de Escrig, ayudando a generar una geometría más simple y proponer las estructuras plegables en proyectos arquitectónicos como la cubierta bidireccional del Parque Juárez de la ciudad de Poza Rica en Veracruz (México), lo cual nos permitió poder desarrollar y proponer sistemas plegables para espacios urbanos en la ciudad ([Morales, 2014; 2018](#)).

Esto derivado a las propuestas de modelización y adecuación geométrica de las cubiertas plegables que se realizaron, modelos que se desarrollaron a escala 1:3, 14 y 1:8. Se cotejaron aspectos de conexión en los nudos, y los alcances de estos modelados ayudaron a adquirir experiencia y conocimiento en la manufactura de los miembros constructivos de una cubierta plegable (De Llorens, 2015; Morales, 2019a).

REFERENCIAS

- Berger, H. (1996). *Light Structures, Structures of light, the art of tensile Architecture*. Switzerland: Basel.
- De Llorens, J. (2015). VI Simposio Latinoamericano de Tenso-estructuras. Realizado conjuntamente con el Congreso de la IASS, Brasilia, 2014. *Revista Informes de la Construcción*, 67(537), 1–1. Disponible en <https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/4059>
- De Llorens, J. (abril, 2011). Los detalles constructivos de las tenso estructuras. Presentado al *IV Simposio Latinoamérica de Tenso Estructuras*, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. Recuperado de https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/15512/PONENCIA_LLORENS.pdf
- Escrig, F. (2012). *Modular, ligero, transformable: un paseo por la arquitectura ligera móvil*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Escrig, F. (1988). Estructuras espaciales desplegables curvas. *Revista Informes de la Construcción*, 39(393), 53–71. <https://doi.org/10.3989/ic.1988.v39.i393.1606>
- Escrig, F. (1984). Estructuras espaciales de barras desplegables. *Revista Informes de la Construcción*, 36(365), 35–46. <https://doi.org/10.3989/ic.1984.v36.i365.1895>
- Escrig, F., Sánchez, J. y Valcarcel, J. (1996). Two Way Deployable Spherical Grids. *Journal Indexing & Metrics*, 11, 257–274. <https://doi.org/10.1177%2F026635119601-231>
- Fuller, M. (2000). *Compresión de las Estructuras en la Arquitectura*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- Fundación Emilio Pérez Piñero. (2016). Proyectos Experimentales. [Online]. Disponible en <http://www.perezpinero.org/proyectos-experimentales/>
- Langbecker, T. (1999). Kinematic Analysis of Deployable Scissor Structures. *International Journal of Space Structures*, 14(1), 1–15. <https://doi.org/10.1260/0266351991494650>
- Morales, C. (2022). Diseños de nodos articulados experimentales para sistemas de cubiertas plegables. *Revista de Arquitectura*, 22(1), 106–114. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2022.24.1.4188>
- Morales, C. (2021a). Diseño de refugio emergente con sistemas plegables. *Arquitectura Revista*, 17(1), 134–152. <https://doi.org/10.4013/arq.2021.171.08>
- Morales, C. (2021b). Desarrollo de un sistema de aspas transformable en las cubiertas plegables. *Revista Informes de la Construcción*, 73(562), 1–11. <https://doi.org/10.3989/ic.73030>
- Morales, C. (2019a). Diseño y construcción de un paraguas plegable para espacios arquitectónicos. *Revista de Arquitectura*, 22(1), 76–89. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2019.21.1.1623>

- Morales, C. (2019b). Desarrollo de un Sistema transformable en las cubiertas plegables tensadas para espacios multifuncionales. [*Tesis doctoral*]. Universidad Politécnica de Madrid, España. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.66247>
- Morales, C. (2018). Diseño y desarrollo de patrones de la forma de una tenso-estructura. *Revista de Arquitectura*, 20(1), 71–87. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2018.20.1.1544>
- Morales, C. (2017). Experiencias y casos de estudio: construcción de una cubierta hiperbólica tensada para espacios tropicales. En, G. Pesantez y W. Flores (comps.). *Arquitectura: experiencias y propuestas para la ciudad* (pp. 177–192). Guayaquil: CIDE. Disponible en <http://192.99.145.142:8080/xmlui/handle/123456789/17>
- Morales, C. (2016a). Construcción Experimental de un sistema Transformable Tensado Plegable. *Revista de Arquitectura*, 18(1), 98–110. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2016.18.1.9>
- Morales, C. (2016b). Development and experimental construction of a transformable roof (first phase). *Magazine Asian Academic Research Journal of Multidisciplinary*, 3, 2319–2801.
- Morales, C. (2014). Proceso de diseño de sistemas transformables en las cubiertas ligeras. *Revista Modulo Arquitectura*, 14(1), 73–96. Disponible en <https://revistascientificas.cuc.edu.co/moduloarquitecturacuc/issue/view/MODULO%20CUC>
- Morales, C. (2013a). Diseño de Cubiertas Plegables Tensadas en la Arquitectura. [*Tesis de Máster*]. Universidad Camilo José Cela, Madrid, España.
- Morales, C. (2013b). Prototipo de Diseño de una Cubierta Retráctil Tensada. *Revista de Arquitectura*, 15(1), 102–110. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2013.15.1.11>
- Morales, C. (2012). Diseño de Cubiertas Ligeras Tensadas. [*Estancia Post Doctoral*]. Universidad Politécnica de Catalunya, España.
- Morales, C. (2009). Diseño de Sistemas Geométricos Estructurales Flexibles para el Espacio Arquitectónico. [*Tesis de Doctorado*]. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México. Disponible en https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000651172
- Sánchez, F. (1992). *Estructuras Ligeras para Grandes Luces*. Madrid: Editorial Fundación Emilio Pérez Piñero.
- Temmerman, N. (2007). Design and Analysis of Deployable Bar Structures for Mobile Architectural Applications. [*Doctoral Thesis*]. Vrije Universiteit Brussel, Brussels. Available: <https://www.vub.be/events/2007/design-and-analysis-deployable-bar-structures-mobile-architectural-applications>