

# COMPARATIVA DE FORMAS ESTRUCTURALES (TOPOLOGÍA) DE TORRE RETICULAR METÁLICA EN TÉRMINOS DE EFICIENCIA ESTRUCTURAL. CASO: TORRE CONCENTRADORA CAMPO HELIÓSTATOS

---

Comparison of structural shapes (Topology) of steel lattice tower according to mechanical efficiency. Case: Main tower heliostat's field

A. Vera Murillo<sup>1\*</sup>, J. Horta Rangel<sup>1</sup>, M. Arroyo Contreras<sup>1</sup>,  
M. Pérez Lara y Hernández<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro,  
Cerro de las campanas S/N, Santiago de Querétaro, Querétaro,  
76010, México

\*Autor de correspondencia  
avera2718@gmail.com



## RESUMEN

La definición de la topología es un paso importante en el proceso de optimización de una torre reticular. Con una forma estructural predefinida el costo final será menor, los tiempos de construcción disminuirán y la estructura tendrá una mayor funcionalidad. En la generación de las distintas formas estructurales se especifican criterios de carga y estructuración. Se proponen para el caso de estudio tres distintas topologías que serán comparadas con la finalidad de obtener el mejor arreglo estructural tomando en consideración diversos criterios de diseño y funcionalidad bajo la premisa del menor peso posible, otros aspectos a considerar han sido los desplazamientos horizontales, la capacidad que tienen de ser estructuras modulares, el tamaño de los miembros y las facilidades de transporte y montaje.

La forma estructural elegida es una torre reticular de forma hexagonal, estructurada mediante marcos con contraventeos. Esta topología es la del peso mínimo de las opciones, amplias facilidades de construcción, una estructuración eficiente y práctica de ser optimizada. La elección se basa en tanto en criterios de eficiencia y peso mínimo, como de facilidades en aspectos constructivos que permiten la modulación del sistema.

El trabajo expresado en este artículo es la primera parte de un proyecto dividido en dos fases, se muestra en el presente trabajo la elección de la conformación estructural de la torre, y posteriormente en la fase dos se optimizará el resultado de la fase uno mediante la aplicación del método de algoritmos genéticos.

### Palabras Clave:

Campo de Heliostatos, Eficiencia Estructural, Topología Estructural, Torre Concentradora

## ABSTRACT

The definition of the topology is an important step in the lattice towers optimization process. With a predefined structural shape, the final cost will be lower, the construction time's will be minimized and the structure will have a better functionality. In the different structural shapes conception, loads and structuring criteria are specified. Three different topologies are proposed to the studied case, these ones will be compared to get the best structural shape. Many designs and functionality's criteria will be used. Other conditions that will be use are the analysis of horizontal displacement's, topologies capacity of being modular structures, the size of their members and the facilities of their transport and montage.

The structural form chosen is a lattice tower of hexagonal shape. This is constructed through frames with restricted lateral displacement. This option has the lowest weight between all the options, many construction facilities, an efficient structuration and an easy capacity of being optimized. The election is based in efficiencies criteria, minimum weight and the facilities in the constructive time that a modular system allows.

The expressed work in this paper is the first part of a two-phase's divided project. In the present work it is shown the work of the election of the structural shape of the tower. Later in phase two the result of the first phase will be optimized through the application of the Genetic Algorithm's Method

### Keywords:

Heliostat's Field, Main Tower, Structure's Efficiency, Structure's Topology.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las torres reticulares son muy populares en el diseño de estructuras de acero esbeltas (Noilublao and Bureerat, 2011), donde el apartado de optimización de las mismas se vuelve una parte esencial. La optimización debe ser basada en una función objetivo multi-variable, donde ésta es la optimización del peso (Prasad Rao et al., 2010).

Un método que es usado comúnmente usado para resolver problemas de búsqueda y optimización es el algoritmo genético (Dede et al., 2011). La optimización de estructuras tipo armaduras con algoritmos genéticos se puede agrupar en tres factores: área transversal de los elementos (sizing), posición de los nodos (configuration) y la topología (topology) (Deb and Gulati, 2011). Para el primer factor, el área transversal de los elementos es modificada mediante el aumento o disminución de las dimensiones o espesores de las secciones utilizadas. La posición de los nodos hace referencia a la longitud que los miembros pueden tomar al modificar de posición las uniones de éstos, y la topología es la forma que tendrá el acomodo de los elementos de la estructura.

El método de elemento finito (MEF) (Gentils et al., 2017), análisis probabilístico (Tessari et al., 2017), ó métodos iterativos (Zwick et al., 2012), ayudan en la optimización a obtener el mejor diseño de la estructura minimizando el costo de las estructuras. Así como se consideran en la optimización las fuerzas últimas de diseño, también deben de tenerse en consideración las características que se dan en la etapa constructiva. Una de las soluciones para minimizar los problemas de éste es el definir la topología de la estructura antes del proceso de optimización iterativa. Rodríguez (de Souza et al., 2016) propone una topología basada en estructuras existentes, donde utiliza alguna de éstas en la optimización para establecer el peso mínimo.

Existen varios métodos de aplicar una optimización multi-objetivo, como el uso de una topología no definida optimizando el área transversal de los perfiles y la posición de los nodos (Sánchez, 2012), o utilizando recursos computacionales para obtener la mejor topología mediante un algoritmo genético (Assimi et al., 2017). El uso de recursos computacionales empleados en la optimización de la topología es mayor a los utilizados en los otros dos factores. Rahami (2008) usa el método energético para pre-optimizar la topología, con esto, al conocer el comportamiento de la estructura y las fuerzas sobre sus elementos, los elementos y nodos principales son determinados de forma sencilla. Para determinar la mejor topología el comportamiento dinámico de la estructura debe ser contemplado mediante un análisis modal para considerar las frecuencias naturales de la misma. Estos resultados se pueden considerar en una topología pre-optimizada (Jin and De-yu, 2006) o en la optimización de una topología ya establecida (Zhu et al., 2017), o mediante un análisis global con eigen valores (Li and Khandelwal, 2017).

En la optimización del diseño de estructuras, el peso no debe de ser el único factor a revisar, también en adición a las consideraciones del distinto tipo de miembros, se deben de considerar los problemas de los tiempos de la etapa constructiva, y contemplar formas más fáciles de producir y construir las estructuras (Jin et al., 2017). Los costos extras del proceso constructivo como un factor de optimización en el algoritmo dentro de un análisis teórico pueden ser determinados y ser añadidos al costo final del peso total de la estructura (Kripakaran et al., 2007). Esto es calculando el número de tipos diferentes de miembros, o usando un algoritmo para homologar perfiles y buscar un acomodo modular de la topología (Durán et al., 2012). Para determinar la estructura modular optimizada la elección de la topología es uno de las cuestiones cruciales. La selección puede ser orientada en cinco factores: conexiones,



tamaño de las piezas de transporte, distancias y tiempos de transporte, los costos al usar o no grúas, y el volumen de material (Salama et al., 2017). Similarmente se puede considerar un proceso de diseño de mecanismo de cuerpo-rígido donde se analiza la funcionabilidad, los grados de libertad y los nodos (Wang et al., 2017). Para tener un mejor diseño de una topología con mejores condiciones, una opción es el considerar unidades modulares para la configuración de la estructura. El hacer lo antes mencionado tiene como ventajas la reducción de los tiempos de diseño y construcción, por lo que se producen menores costos (Generalova et al., 2016).

Como se menciona anteriormente un punto importante en la optimización de las torres reticulares es la consideración acerca de la elección de la mejor topología, el obtener una forma estructural teórica puede resultar en una estructura con un peso propio mínimo. Los extra costos derivados en la anterior propuesta se derivan en los mayores tiempos constructivos, el mayor número de perfiles distintos utilizados que incrementaría los costos, por lo que dicha topología teórica puede no resultar ser la más económica en términos globales.

El pre-definir la forma estructural es una mejor opción, pero no solo considerando en el análisis las topologías existentes en la industria, también se requieren considerar criterios modulares y analizarlos mediante consideraciones de posibles problemas de tiempos y costos en la etapa constructiva.

En este artículo se presentará el análisis de los factores que son importantes en la comparativa entre distintas formas estructurales, donde ésta concluirá con la mejor topología para una torre reticular de heliostatos. Finalmente se mostrarán las conclusiones de la mejor metodología utilizada y sus características propias idóneas para poder ser optimizada.

El caso particular de una torre reticular concentradora de un campo de heliostatos será utilizado en este artículo para esquematizar la metodología a usar.

## 2. TORRE CONCENTRADORA DE ENERGÍA SOLAR DE UN CAMPO DE HELIÓSTATOS

Las plantas termo-solares con torre central concentradora son un sistema dedicado a la captación de energía solar, donde dicha energía captada es transformada en energía eléctrica a través del proceso de un sistema termodinámico.

El sistema es formado por un campo de heliostatos (estructuras con paneles móviles reflejantes de la energía solar) que redirigen la energía solar hacia un receptor que transmite esa energía calorífica hacia un mecanismo termodinámico para transformarla en energía eléctrica. El campo de heliostatos tiene como eje focal una torre concentradora, donde ésta es la que da soporte, altura, posición y protege al receptor antes mencionado. Los elementos de un campo de heliostatos se esquematizan en la Figura 1.

Alrededor del mundo hay varias estructuras utilizadas como torre central receptora de energía solar. Existe un campo de heliostatos en Sevilla, en España, nombrada PS20. Ésta es una torre de concreto de sección constante con extracción de volumen de 165 m de altura (Termosolar, 2009).

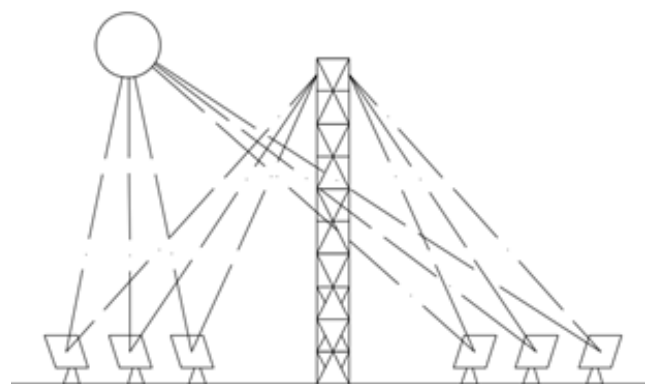


Figura 1. Torre central de campo de heliostatos

En Estados Unidos de Norteamérica, en el desierto de Mojave en California, hay un campo de heliostato de torre central llamado Sistema Generador de Energía Solar Eléctrica Ivanpah (Terrain, 2014), donde la torre central es reticular de acero de 139 m de altura.

En México la investigación de energías renovables es realizada por el Centro de Investigación de Energía (CIE) con el apoyo de Universidades y de otros centros de investigación. En el país existe el Campo Experimental de Energía Termo-Solar de Torre Central en el estado de Sonora, ésta torre tiene una base cuadrada con cuatro lados iguales de altura de 30 m (Monteverde, 2011). La estructural de dicha torre se muestra en la Figura 3.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Modelos matemáticos de las torres de helióstatos

Se propondrán tres formas estructurales distintas que conformarán respectivamente tres torres reticulares que funcionarán como torres concentradoras para un campo de helióstatos. Dichas propuestas tendrán las características de ser estructuras reticulares de acero y modulares. Éstas estarán basadas en torres reticulares existentes, provenientes de la literatura y de propuestas propias.

La estructuración es un factor que determina la complejidad del proceso constructivo, del diseño, desarrollo del proyecto y uso de la estructura, el tipo de estructuración que optimiza y mejor cada uno de los aspectos antes mencionados es la construcción reticular. Las ventajas de este tipo de estructuras son su topología modular, el emplear trabajadores no especializados, el uso de conexiones entre elementos de forma sencilla, la practicidad del transporte de materiales y el peso optimizado que la estructura pudiera tener. El comportamiento de las diferentes topologías se obtendrá a través de los resultados

de la realización de sus respectivos modelos mediante el método de elemento finito (MEF), donde el análisis será estático lineal, con un diseño plástico de los elementos.

El análisis será estático, por lo que, a partir del teorema de potencia y energía, se utilizará una aproximación con el MEF usando valores reales, por lo que el comportamiento se rige por el modelo discreto del método de rigideces ejemplificado en la Ec. (1).

$$\int_{\Gamma} [N]^T P d\Gamma + \int_{Vol} [N]^T \{b\} dVol = \int_{Vol} [B]^T [D] [B] dVol \{U\} \quad (1)$$

Donde: [N]: matriz de las funciones de forma.

Para la creación de los modelos, se utilizará el software SAP 2000 V16, donde se empleará en el módulo de diseño el reglamento del AISC LRFD 99, esto debido a que el reglamento mexicano de estructuras de acero

$P = \tilde{S} n$  ;  $\tilde{S}$ : tensor de Piola – Kirchhoff

$\Gamma$  : valores en la frontera.

$\{b\}$  : vector de fuerzas de cuerpo.

[B] : matriz de derivadas de las funciones de forma.

Vol: volumen del sólido en estudio

$\rho$  : densidad del material

está basado en el LRFD. Las combinaciones de carga se colocan manualmente obtenidas del Reglamento de Construcción del DF (Arnal Simón and Betancourt Suárez, 2004), las cuales se muestran en la Tabla 1.

Donde: Cm hace referencia a la carga muerta. Cv a la carga viva máxima. Cvacc a la carga viva accidental. Wx es el viento que actúa en la dirección x. Wy es el viento que actúa en la dirección y. Sx es el sismo en el sentido x y Sy es el mismo existente en el sentido Y. Los modelos estarán regidos por las normas del reglamento de construcción del país (Arnal Simón and Betancourt Suárez, 2004),



| <i>Combinaciones de Servicio</i>        | <i>Combinaciones de Diseño</i>                      |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| $C_m + C_v$                             | $1.4 C_m + 1.4 C_v$                                 |
| $C_m + C_{vacc} + (W_x \text{ ó } W_y)$ | $1.1 C_m + 1.1 C_{vacc} + 1.1 (W_x \text{ ó } W_y)$ |
| $0.9C_m + 0.9C_{vacc} + S_x + 0.3 S_y$  | $1.1 C_m + 1.1 C_{vacc} + 1.1 S_x + 0.33 S_y$       |
| $0.9C_m + 0.9C_{vacc} + S_y + 0.3 S_x$  | $1.1 C_m + 1.1 C_{vacc} + 1.1 S_y + 0.33 S_x$       |

**Tabla 1.** Combinaciones de carga

tanto en los criterios de diseño por cargas últimas y en las revisiones por servicio. Los desplazamientos horizontales permisibles por motivo de las cargas de viento y que se señalan en el reglamento mexicano, son de 0.005 veces la diferencia de altura (30 m) cuando no hay elementos que puedan ser dañados, o de 0.002 veces la diferencia de altura cuando hay elementos que pueden ser dañados. Por lo anterior, el límite de desplazamientos máximos permitido será el de 0.005 veces la altura, es decir, de 15 cm. Como límite establecido con motivo del buen funcionamiento del receptor de energía solar, se indica un desplazamiento máximo permisible de 10 cm.

Como criterio de diseño todos los elementos trabajarán con una eficiencia mayor al 80% de su capacidad, a menos que el tener elementos con eficiencia menor contribuya a la rigidez de la estructura provocando que otros elementos sean más ligeros y se contribuya a que el peso total de la torre sea menor a que si trabajaran al 80% o más de su eficiencia. Además, se permitirá que su eficiencia sea menor para priorizar una estructuración modular.

### 3.2. Características y cargas aplicadas a los modelos

Para la creación de los modelos de las torres de heliostatos se utilizarán las mismas consideraciones y las mismas cargas para poder tener una comparativa adecuada, además de que se tomarán como requisitos base los

obtenidos por parte de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) para el diseño de una torre de heliostatos en su campus Juriquilla.

Buscando homologar comportamientos de los elementos, y al ser el tipo de secciones utilizados para la torre de la UAQ ya mencionada, se utilizarán solo secciones cuadradas y rectangulares del tipo PTR y HSS. El área total útil para la base de la torre es de 6m x 6 m. El factor de esbeltez de la torre debe tener un valor máximo de 5, esto para tener amplificaciones dinámicas en los efectos de viento. Las torres tendrán una altura de 30 m.

El peso propio será incluido dentro del análisis de los modelos matemáticos. En el nivel superior de las torres se colocará un cuarto de máquinas, donde se colocarán los aparatos que convertirán la energía solar en eléctrica, los cuales tendrán un peso total de 2 Tn, el cual será repartido en toda el área efectiva del entrepiso. Para los sistemas de piso del cuarto de máquinas y el de la azotea del mismo, se usará una carga muerta de 50 kg/m<sup>2</sup>, siendo el peso de una rejilla Irving con lámina.

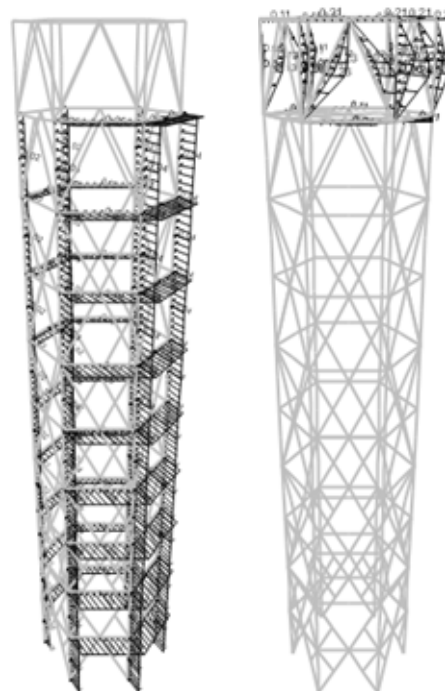
Para el análisis de las cargas vivas, se considerarán las vivas máximas y vivas accidentales, las primeras serán de 40 kg/m<sup>2</sup> para azotea y de 100 kg/m<sup>2</sup> en el cuarto de máquinas. Para las vivas accidentales serán de 20 kg/m<sup>2</sup> en azotea y de 70 kg/m<sup>2</sup> en el cuarto de máquinas. Para dichas cargas se tomaron

como base las especificadas en las Normas Técnicas Complementarias del reglamento de Construcción del Distrito Federal del 2004 (NTC RDF).

Las fuerzas de viento se obtendrán del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad de México, considerando que la estructura está en el Grupo B y con un viento del Tipo 1. Se toman las consideraciones regionales de la ciudad de Querétaro, por lo que la presión dinámica de diseño será de 260 kg/m<sup>2</sup> en las áreas cerradas del cuarto de máquinas y de 155 kg/m<sup>2</sup> en las áreas abiertas aplicando sobre las áreas de los elementos. El diseño y revisión de los elementos se realizará de acuerdo a las NTC RDF 2004.

Un resumen de las cargas gravitacionales aplicadas se puede apreciar en la Tabla 2.

La aplicación de las cargas de viento se esquematiza en la Figura 2. En la primera (A) se muestra cómo se aplica la presión de viento sobre el área de los elementos, y en la segunda (B) se toman las áreas correspondientes del total del marco tapado sobre los elementos del cuarto de máquinas.



**Figura 2.** Aplicación de cargas de viento. A) Aplicación en elementos. B) Aplicación en cuarto de máquinas

| <i>Cuarto de máquinas</i>             | <i>Azotea</i>                         |
|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Peso propio (incluido en programa)    | Peso propio (incluido en programa)    |
| Peso de equipos: 2 Tn/Area efectiva   | -----                                 |
| Sistema de piso: 50 kg/m <sup>2</sup> | Sistema de piso: 50 kg/m <sup>2</sup> |
| C. Viva max= 100 kg/m <sup>2</sup>    | C. Viva max= 40 kg/m <sup>2</sup>     |
| C. Viva acc = 70 kg/m <sup>2</sup>    | C. Viva acc= 20 kg/m <sup>2</sup>     |

**Tabla 2.** Resumen de cargas gravitacionales



### 3.3. Comparativa de las formas estructurales

En la elección de la topología final se usará un criterio de pre-optimización, el cual consiste en analizar y determinar que topología es más ligera que las demás. Esto se realiza mediante un análisis simple, sin la necesidad de algún algoritmo de optimización. Dicho análisis determinará un criterio de peso por área, pero para este caso al tratarse de torres con mismo tamaño de base y altura, el peso total será el parámetro a obtener. Para ello todas las topologías se analizarán usando las mismas fuerzas y las mismas consideraciones en los modelos, todo con el fin de obtener una comparativa viable.

Para cualquier topología utilizada para cualquier tipo de estructura hay varios factores que son determinantes para la elección de la misma. Los factores determinados en variables discretas son: el uso que va a tener la estructura, la capacidad que tengan de ser modulares, las características de sus conexiones, tamaños de miembros individuales, capacidad de transporte y capacidad de ser optimizadas. Los factores determinados en variables continuas son el peso total de la estructura y su desplazamiento máximo horizontal producto de las fuerzas de viento.

Para determinar el mejor uso de la estructura se contemplará el uso que va a tener, se realizará un mayor estudio acerca del estado del arte y de las estructuras existentes que tengan el mismo uso. Se realizará un estudio de las formas estructurales existentes para obtener la mejor topología, donde el análisis contemplará su historia, las provenientes de la zona local, el tipo de fallas que pueden tener y el estudio de éstas, y las topologías realizadas mediante el estudio de la teoría. Se determinará cuáles de ellas tienen una mayor funcionabilidad, los problemas que tienen durante su vida útil, los problemas de su etapa constructiva y principalmente los sobrecostos de la estructura.

Se analizará la capacidad que tenga la topología de ser convertida en una estructura modular, es decir, de poder tener las mismas medidas en elementos del mismo tipo y que se puedan repetir en sus distintos niveles. El tener estructuras modulares incrementan la facilidad de su construcción, minimizando costos y tiempos.

Para determinar si la topología puede ser utilizada como un módulo eficiente se realizará un análisis del tipo de conexión que se van a necesitar, los materiales a utilizar, la capacidad de los trabajadores ante trabajos especializados, conexiones hechas en campo, en taller o ambas.

Se determinarán elementos de la topología con mismos tamaños y mismas secciones para tener una constitución modular. Dentro del análisis se incluirá la practicidad de transporte de módulos o de secciones, ya que a menores tamaños se requieren vehículos de menor embalaje, por lo que se disminuyen los costos de transporte. Así como se realizará el análisis de la necesidad de usar grúas o no para los montajes.

Se determinará el peso propio total de cada una de las formas estructurales, de tal forma que serán variables continuas que podrán ser comparadas de forma sencilla. Al igual que se obtendrán y se compararán los desplazamientos horizontales máximos productos de las cargas de viento.

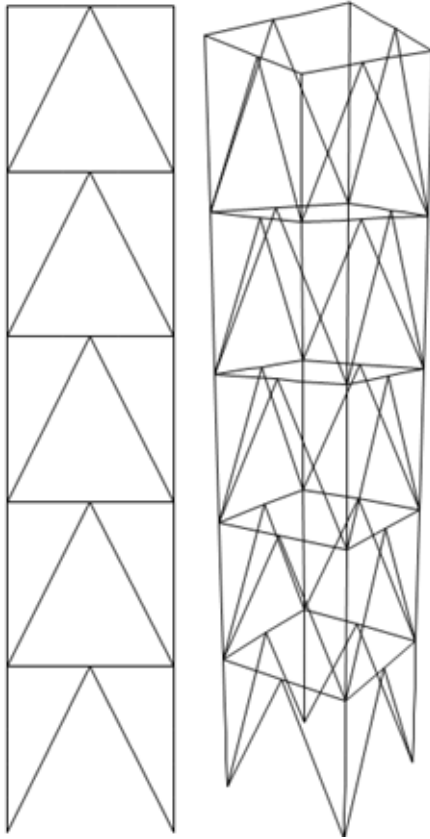
La comparativa se hará mediante todos los puntos antes expuestos, dando un mayor porcentaje de decisión al peso propio de la torre.



## 4. RESULTADOS

### 4.1 Topología Uno

La topología elegida para una de los modelos de la torre de helióstatos será la existente



**Figura 3.** Forma estructural de torre experimental de Sonora

de la torre experimental de Sonora, la cual es la que se observa en la Figura 3. Analizando dicha topología, cuenta con los espacios necesarios para el izaje de equipos y su colocación en el piso de máquinas. Los receptores de la energía solar se pueden colocar en todas sus caras para aprovechar la energía de sus cuatro lados.

Los tamaños de los miembros a pesar de que tienen una longitud de 6 metros en columnas y traveses y 6.7 en diagonales aún son prácticos de transportar, pero ya se necesitarían transportes de mayor tamaño, o por la practicidad se pueden dividir las piezas para tener una mayor facilidad de transporte, aunque significa más conexiones en campo. Para el izaje individual o en módulos de la estructura se requiere el uso de grúa.

Las secciones utilizadas para este modelo se señalan en la Tabla 3. El peso propio de los elementos de la torre da una suma total de 15.79 tn. El desplazamiento máximo existente en la parte superior de la torre por motivo de las fuerzas de viento es de 5.25 cm.

Las características obtenidas de la topología uno se resume en la Tabla 4.

| <i>Sección</i>  | <i>Elemento</i> | <i>Material</i> | <i>Peso [Tn]</i> |
|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| HSS 4"x8"x1/4"  | Vigas           | A500 Gr B HSS   | 3.4945           |
| HSS 5"x5" 1/4"  | Diagonales      | A500 Gr B HSS   | 6.455            |
| HSS 8"X8"X5/16" | Columnas        | A500 Gr B HSS   | 5.84             |

**Tabla 3.** Secciones y características de elementos de topología 1



| <i>Long. Máx. de miembro</i> | <i>Peso total</i> | <i>Desplazamiento Max.</i> |
|------------------------------|-------------------|----------------------------|
| 6.7 mts                      | 15.79 Tn          | 5.25 cms                   |

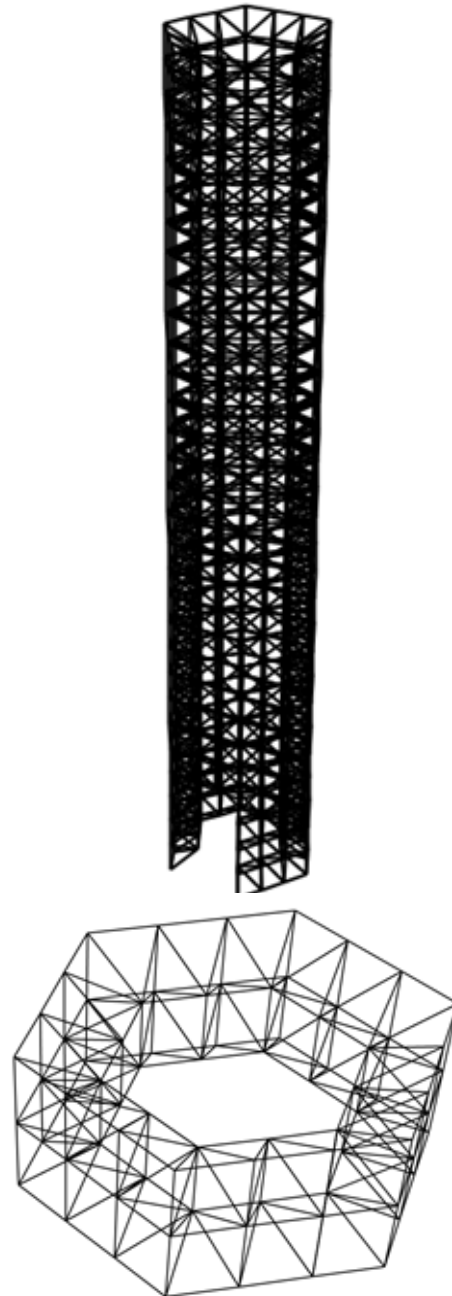
**Tabla 4.** Resultados de la Topología 1

## 4.2 Topología Dos

Para esta opción se utilizará una forma hexagonal de base, esto para propiciar que la energía pueda ser captada desde más ángulos para que la refracción de ésta sea menor a si se tuvieran solo cuatro lados de base. Se probaron torres con bases de mayor número de lados, pero éstas, aunque eran más rígidas el peso total de la torre se incrementaba haciendo más cara la inversión inicial.

La estructuración es a base de doble malla espacial de base hexagonal. El tamaño de la cuadrícula es de un metro y el espaciamiento entre las dos mallas es de un metro por igual. La estructuración se muestra en la Figura 4. Por el tamaño de los elementos (un metro) y las cargas que resisten solo se colocan elementos PTR's cuadrados, por lo que el transporte de éstos es barato y práctico, sus conexiones son sencillas y no se requiere de mano de obra especializada. Además, si se transportan módulos en lugar de elementos individuales, sigue siendo fácil de transportar, fácil de colocar sus conexiones y ligera, de forma que no es indispensable el uso de gruas.

El peso propio de la torre es de 11.88 Ton y el desplazamiento máximo en la parte superior es de 5.14 cm producto de las fuerzas de viento. Los pesos y secciones utilizadas se pueden apreciar en la Tabla 5.



**Figura 4.** Topología dos

| <i>Sección</i>      | <i>Localización</i> | <i>Material</i> | <i>Peso [Tn]</i> |
|---------------------|---------------------|-----------------|------------------|
| PTR 2"x2" Cal 14    | Otros módulos       | A500 Gr A       | 11.1755          |
| PTR 2.5"x2.5" Cal 7 | 1º y 2º módulo      | A500 Gr A       | 0.7077           |

**Tabla 5.** Secciones y características de elementos de topología 2  
Las características obtenidas de la topología dos se resumen en la Tabla 6

| <i>Long. Máx. de miembro</i> | <i>Peso total</i> | <i>Desplazamiento Max.</i> |
|------------------------------|-------------------|----------------------------|
| 1 m                          | 11.88 Tn          | 5.14 cms                   |

**Tabla 6.** Resultados de la Topología 2.

| <i>Long. Máx. de miembro</i> | <i>Peso total</i> | <i>Desplazamiento Max.</i> |
|------------------------------|-------------------|----------------------------|
| 3.35 m                       | 10.25 Tn          | 5.53 cms                   |

**Tabla 7.** Secciones y características de elementos de topología 3.

| <i>Sección</i>   | <i>Elemento</i> | <i>Material</i> | <i>Peso [Tn]</i> |
|------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| HSS 6"x4"x3/16"  | Vigas           | A500 Gr B HSS   | 3.2903           |
| HSS 6"x6"x3/16"  | Columnas        | A500 Gr B HSS   | 3.9735           |
| PTR 2"x2" Cal 11 | Diagonales      | A500 GrA PTR    | 0.2567           |
| PTR 3" Cal 11    | Riostras        | A500 GrA PTR    | 2.7288           |

**Tabla 8.** Resultados de la Topología 3.

### 4.3 Topología Tres

La estructuración de esta torre será a base de módulos compuestos de marcos contraventeados de acero, donde en los primeros niveles los contraventeos tendrán rigidizantes. Los módulos formarán marcos de 3 m x 3 m, donde los elementos de mayor longitud son los contraventeos con 3.35 m de longitud, por lo que el transporte de elementos es bastante práctico. Para el montaje del módulo completo se necesitaría grúa por el tamaño que se manejan. Si el montaje se realiza miembro por miembro, las conexiones son comunes por lo que no se necesita personal altamente capacitado, la gran mayoría de conexiones se pueden tener realizadas des-

de taller. La forma estructural se aprecia en la Figura 5.

En esta topología como en su similar de la topología 2, tiene una forma hexagonal de base, para propiciar que la pérdida de energía solar por la refracción sea mínima y la torre tenga una mayor eficiencia. Las secciones utilizadas y el peso total se pueden apreciar en la Tabla 7. El peso total de la topología es de 10.25 tn, y el desplazamiento máximo producto de las fuerzas de viento es de 5.53 cm.

Las características obtenidas de la topología tres se resumen en la Tabla 8.



## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Uno de los factores importantes es la funcionalidad que puedan tener las topologías, resumiendo las características de las tres topologías expuestas, la primera ya es una existente en el país y la segunda y tercera son propuestas nuevas. La primera tiene amplios espacios para la colocación de escaleras y espacios para el izaje de equipos, pero la forma cuadrada limita la colocación de los receptores a solo cuatro direcciones principales, por lo que las pérdidas por refracción de la energía solar son mayores a las torres hexagonales.

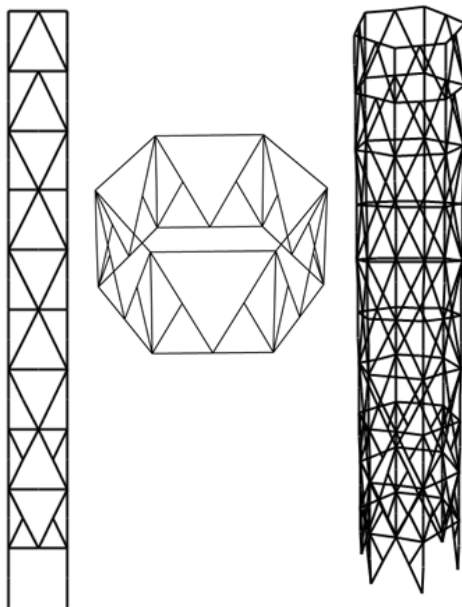
Dentro de la funcionalidad se deben de considerar las áreas útiles dentro de la torre para la colocación de escaleras (no de caracol ni marinas) además de espacios libres para izaje de equipos mecánicos. En este criterio, la de mayor espacio libre para esto es la topología uno, y la de menor es la topología 2, ésta última a causa de que la estructuración es de doble malla espacial por lo que se tiene radio de un metro menos comparada con la tercera topología. La topología tres cumple con los espacios libres para colocar esca-

leras amplias y para una zona de izaje de los equipos.

Para el comportamiento de las conexiones, las que se utilizarán en la topología uno y tres serán muy similares, a base de conexiones a momento en los marcos y los contra-venteos liberados a momento. La diferencia entre éstas dos topologías en sus conexiones radica en la magnitud de los elementos mecánicos que resisten, en la topología uno los momentos y cortantes son mayores al tener marcos de mayor claro y menor número de columnas a donde distribuir las fuerzas. La topología dos solo tendrá conexiones a tensión o compresión, y al ser todas las conexiones iguales, se puede proponer una placa de conexión igual para todas, utilizando uniones soldadas en campo o para simplificar la mano de obra se pueden colocar atornilladas. Las conexiones de la topología dos pueden ser similares a las de las existentes en la tridilosa.

En la etapa de transporte de los elementos, el más caro sería el de la topología uno, al ser la que cuenta con las piezas de mayor longitud, la de menor sería la topología dos por tener los elementos de menor longitud. A pesar de que la topología dos tiene los elementos más cortos, también es la que tiene un mayor número de elementos. La topología tres cuenta con una cantidad un poco mayor de elementos a la topología uno, pero con longitudes mucho menores y más fáciles de transportar.

La topología dos cuenta con una gran cantidad de perfiles, pero al ser una estructura bastante rígida y con comportamiento solo bajo carga axial, los perfiles elegidos para la torre no varían en gran medida, tendiendo a usar los mínimos disponibles, por lo que su capacidad de ser optimizada mediante algún algoritmo evolutivo es baja. Las topologías uno y tres son más susceptibles a ser optimizadas, ya que sus elementos tienen comportamientos a flexo-compresión y una rigidez muy dependiente de cualquier cambio de perfiles, por lo que las posibles com-



**Figura 5.** Alzados de torre completa y módulo con topología 3.

binaciones entre perfiles producen una lista amplia.

El peso total de los elementos de la torre uno es la mayor dentro de las tres propuestas, y siendo la número tres la que tiene el menor peso. A pesar de que la primera forma estructural tiene menor número de elementos, los perfiles tienen una mayor área, esto provocado por la mayor concentración de esfuerzos que tienen. La diferencia de peso entre las topologías uno y tres es de 5.5 tn. La diferencia entre la topología tres y dos es menor, siendo un poco mayor a 1.5 tn.

Los desplazamientos producto de las fuerzas del viento son muy similares en las tres topologías, la diferencia entre la más rígida (topología dos) comparada con la topología más flexible (topología tres) es de solo 3.9 mm. Por lo que se considera que las tres tienen un buen comportamiento ante cargas de servicio.

La topología tres al ser la elegida como la mejor para los fines buscados, será la forma estructural a utilizar en una fase posterior a este trabajo para ser optimización de energía solar, además de espacios útiles y un proceso constructivo más barato y sencillo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo durante toda esta investigación.

## REFERENCIAS

Arnal Simón, L., and M. Betancourt Suárez. 2004. Reglamento de construcción para el Distrito Federal.

Assimi, H., A. Jamali, and N. Nariman-zadeh. 2017. Sizing and topology optimization of truss structures using genetic programming. *Swarm Evol. Comput.* 0–1. doi:10.1016/j.swevo.2017.05.009. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.swevo.2017.05.009>

ble from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.swevo.2017.05.009>

Deb, K., and S. Gulati. 2011. Design of Truss-Structures for Minimum Weight using Genetic Algorithms. Elsevier Sci. Volume 37:Pages 447–465.

Dede, T., S. Bekiroglu, and Y. Ayvaz. 2011. Weight minimization of trusses with genetic algorithm. *Appl. Soft Comput. J.* 11:2565–2575. doi:10.1016/j.asoc.2010.10.006.

Durán, O., L. Pérez, and A. Batocchio. 2012. Expert Systems with Applications Optimization of modular structures using Particle Swarm Optimization. 39:3507–3515. doi:10.1016/j.eswa.2011.09.041.

Generalova, E. M., V. P. Generalov, and A. A. Kuznetsova. 2016. Modular Buildings in Modern Construction. *Procedia Eng.* 153:167–172. doi:10.1016/j.proeng.2016.08.098. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.098>

Gentils, T., L. Wang, and A. Kolios. 2017. Integrated structural optimisation of offshore wind turbine support structures based on finite element analysis and genetic algorithm. *Appl. Energy.* 199:187–204. doi:10.1016/j.apenergy.2017.05.009. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.009>

Jin, P., and W. De-yu. 2006. Topology optimization of truss structure with fundamental frequency and frequency domain dynamic response constraints. *Acta Mech. Solida Sin.* 19:231–240. doi:10.1007/s10338-006-0628-2. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s10338-006-0628-2>

Jin, S. W., H. Ohmori, and S. J. Lee. 2017. Optimal design of steel structures considering welding cost and constructability of beam-column connections. *J. Constr. Steel Res.* 135:292–301. doi:10.1016/j.jcsr.2017.03.020. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.03.020>

Kripakaran, P., A. Gupta, and J. W. Bau-



gh. 2007. A novel optimization approach for minimum cost design of trusses. *Comput. Struct.* 85:1782–1794. doi:10.1016/j.compstruc.2007.04.006.

Li, L., and K. Khandelwal. 2017. Topology optimization of geometrically nonlinear trusses with spurious eigenmodes control. *Eng. Struct.* 131:324–344. doi:10.1016/j.engstruct.2016.11.001. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.001>

Monteverde, H. G. 2011. Campo de Pruebas de Helióstatos: impulsa el desarrollo nacional en fuentes renovables. *Gas. USON.* 265:24.

Noilublao, N., and S. Bureerat. 2011. Simultaneous topology, shape and sizing optimisation of a three-dimensional slender truss tower using multiobjective evolutionary algorithms. *Comput. Struct.* 89:2531–2538. doi:10.1016/j.compstruc.2011.08.010. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.08.010>

Prasad Rao, N., G. M. S. Knight, N. Lakshmanan, and N. R. Iyer. 2010. Investigation of transmission line tower failures. *Eng. Fail. Anal.* 17:1127–1141. doi:10.1016/j.engfailanal.2010.01.008. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.01.008>

Rahami, H., A. Kaveh, and Y. Gholipour. 2008. Sizing, geometry and topology optimization of trusses via force method and genetic algorithm. *Eng. Struct.* 30:2360–2369. doi:10.1016/j.engstruct.2008.01.012.

Salama, T., A. Salah, O. Moselhi, and M. Al-hussein. 2017. Automation in Construction Near optimum selection of module configuration for efficient modular construction. doi:10.1016/j.autcon.2017.03.008.

Sánchez, S. 2012. Optimización estructural y topológica de estructuras morfológicamente no definidas mediante algoritmos genéticos. Universitat Politècnica de Valencia.

de Souza, R. R., L. F. Fadel Miguel, R. H. Lopez, L. F. F. Miguel, and A. J. Torii. 2016. A procedure for the size, shape and topology optimization of transmission line tower structures. *Eng. Struct.* 111:162–184. doi:10.1016/j.engstruct.2015.12.005. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.12.005>

Termosolar. 2009. PS20 mayor planta termosolar comercial del mundo con tecnología de torre, de 20 MW de potencia. 7–10.

Terrain, L. 2014. La planta solar mas grande del mundo. METALOCUS. Available from: <https://www.metalocus.es/es/noticias/la-planta-solar-más-grande-del-mundo>

Tessari, R. K., H. M. Kroetz, and A. T. Beck. 2017. Performance-based design of steel towers subject to wind action. *Eng. Struct.* 143:549–557. doi:10.1016/j.engstruct.2017.03.053. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.053>

Wang, H., W. Yu, and G. Chen. 2017. Computer-Aided Design An approach of topology optimization of multi-rigid-body. *Comput. Des.* 84:39–55. doi:10.1016/j.cad.2016.12.002.

Zhu, M., Y. Yang, J. K. Guest, and M. D. Shields. 2017. Topology optimization for linear stationary stochastic dynamics: Applications to frame structures. *Struct. Saf.* 67:116–131. doi:10.1016/j.strusafe.2017.04.004. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.strusafe.2017.04.004>

Zwick, D., M. Muskulus, and G. Moe. 2012. Iterative optimization approach for the design of full-height lattice towers for offshore wind turbines. *Energy Procedia.* 24:297–304. doi:10.1016/j.egypro.2012.06.112. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.06.112>