



## REVISIÓN DE CIMENTACIONES EN TORRES DE TRANSMISIÓN: MÉTODOS INNOVADORES DE ANÁLISIS Y DISEÑO

## REVIEW ABOUT FOUNDATIONS IN TRANSMISSION TOWERS: INNOVATIVE METHODS OF ANALYSIS AND DESIGN

Claudia Martínez González<sup>1</sup>, Sergio A. Zamora Castro<sup>1\*</sup>, Rolando Salgado Estrada<sup>1</sup>, Margarita Díaz Olalde<sup>1</sup> y María Eugenia A. Díaz Vega<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat, región Veracruz, Universidad Veracruzana. \*autor de correspondencia: [szamora@uv.mx](mailto:szamora@uv.mx).

Recibido 22 de septiembre 2019; recibido en forma revisada 19 de noviembre 2019; aceptado 2 de diciembre 2019

### RESUMEN

Este trabajo presenta una revisión del estado del arte sobre los métodos más innovadores de cimentaciones empleados para las torres de transmisión, así como los factores que impactan directamente sobre las cimentaciones y que son clave para el análisis y diseño geotécnico. El objetivo de ésta investigación es encontrar las características, dimensiones y acciones mecánicas a nivel de conexión con la cimentación, así como factores que inciden en las torres de transmisión y que tienen un impacto directo sobre las cimentaciones para determinar un diseño geotécnico óptimo según sea el caso de estudio que se presente.

**Palabras clave:** cimentación, torre de transmisión, mecánica de suelos, elemento finito.

### ABSTRACT

This paper presents a review of the state of the art on the most innovative methods of foundations used for the transmission towers, as well as the factors that directly impact on the foundations and that are key to the analysis and geotechnical design. The objective of this research is to find the characteristics, dimensions and mechanical actions at the level of connection with the foundation, as well as factors that affect the transmission towers and that have a direct impact on the foundations to determine an optimal geotechnical design according to the case study that is presented.

**Keywords:** foundation, transmission tower, soil mechanics, finite element.

### INTRODUCCIÓN

Una línea de transmisión eléctrica es básicamente el medio físico mediante el cual se realiza la transmisión y distribución de la energía eléctrica, y las estructuras que sirven de soporte de los conductores de las líneas de transmisión son llamadas torres de transmisión.

Las torres de transmisión eléctrica responden a las necesidades específicas de cada proyecto, son construidas en acero galvanizado por inmersión en caliente. Pueden tener gran variedad de formas y tamaños en función del uso y el voltaje y se utilizan tanto en la distribución eléctrica de alta y baja tensión como en sistemas de corriente continua, tales como

la tracción ferroviaria. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de torre de transmisión eléctrica tipo.

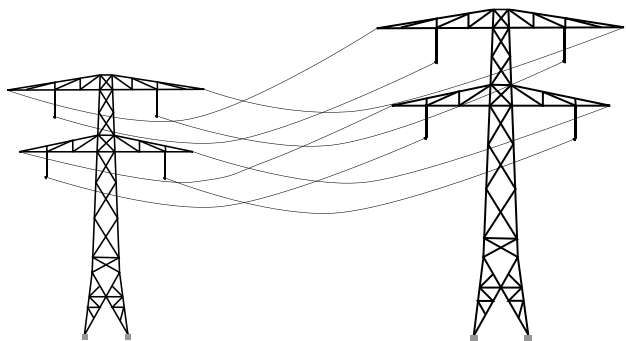


Figura 1. Torre de transmisión eléctrica tipo

La energía eléctrica es muy importante, ya que constituye un factor indispensable para el desarrollo del país, por ello la infraestructura para la transmisión de la energía es igual de importante y debe ser segura y confiable (Barragán, 2013).

Las torres de transmisión deben ser capaces de soportar las distintas acciones a las que se verán sometidas a lo largo de su vida útil. Es importante mencionar que las torres de transmisión están diseñadas para soportar acciones extraordinarias, generadas por fenómenos meteorológicos cíclicos. La falla de alguno de los elementos que conforman la torre puede representar grandes pérdidas económicas e incluso pérdida de vidas humanas debido a la suspensión del suministro de energía eléctrica en hospitales, escuelas, fábricas y casas habitación (CFE JA100-64, 2011).

Las cargas a las que se encuentra sujeta una torre de transmisión son debidas a la masa de la línea de transmisión y accesorios, a las maniobras de tendido durante la construcción y mantenimiento, además de las cargas generadas por el viento. Algunos otros efectos climatológicos que deben soportar las torres de transmisión son los generados por el hielo y temperaturas extremas. Un factor importante para el diseño de las torres de transmisión es su ubicación, ya que ésta dictará la magnitud de los efectos climatológicos a los que estará sujeta la estructura y el tipo de suelo para el diseño de la cimentación

Dada la importancia de este tipo de estructuras es importante realizar un buen diseño geotécnico de la cimentación tomando en cuenta todas las variables que interactúan con la cimentación.

Las propiedades mecánicas del terreno influyen de manera significativa en definir la rigidez crítica que debe proporcionar la base de apoyo, para proporcionar suficiente rigidez angular para evitar el volteo de la superestructura por rotación de la base (Rodríguez et al. 2002).

### **Partes esenciales de una torre de transmisión y su clasificación.**

La función de las líneas de transmisión es llevar la energía eléctrica desde los puntos de generación hasta el lugar de consumo. Esta transmisión puede ser subterránea o aérea. Las líneas de transmisión aérea de alta tensión están compuestas principalmente por tres elementos, los cuales son: 1. cables, son los encargados de transmitir la energía eléctrica, están fabricados con alambres de acero galvanizado cubiertos por alambres de aluminio dispuestos de forma helicoidal, 2. cadenas de aisladores, son elementos que sirven para unir los cables conductores a la estructura de la torre y torres de transmisión, 3. sistema estructural con elementos que se encargan de sostener los cables que transmiten la energía eléctrica. Se fabrican con perfiles de acero estructural de alta resistencia unidos por medio de tornillos y placas de conexión.

Las torres de transmisión tienen la función básica de soportar los cables de conducción eléctrica, así como los cables de guarda, que son los encargados de proteger las líneas de transmisión de las descargas atmosféricas, además de que son también utilizados para la transmisión de voz y datos a través de la fibra óptica. Las torres de transmisión están compuestas por diferentes componentes, como son: cables de guarda, aisladores, herrajes, crucetas, cuerpo recto, cuerpo piramidal, cerramientos, extensiones y stub, que es la parte encargada de unir la superestructura con la cimentación de la torre. Los elementos barra que forman las torres de transmisión son generalmente perfiles de acero estructural (CFE JA1000-50, 2016). En la Figura 2 se muestra las partes esenciales de una torre de transmisión eléctrica tipo.

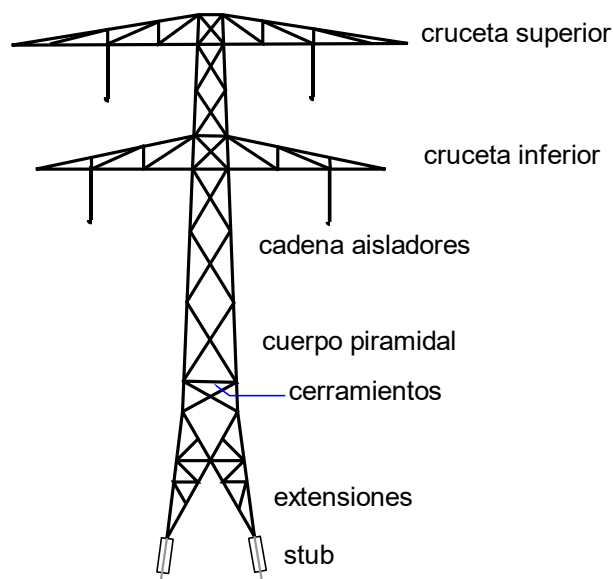


Figura 2. Partes esenciales de una torre de transmisión eléctrica tipo.

Además, por su posición y función, las torres se pueden clasificar en: torres de suspensión, de deflexión, de remate y de atraque (CFE JA1000-50, 2016)

Las torres de transmisión también se diferencian de acuerdo al tipo de tensión de operación de la línea. En México se tienen líneas de alta tensión de 400, 230 y 115 kV.

### Principales cargas por considerar en la cimentación.

Para realizar el diseño de la cimentación es importante considerar las cargas que inciden sobre la estructura y que afectan de manera directa la relación estructura-cimentación.

En el diseño de la estructura y en función de su uso se deben considerar los siguientes tipos de cargas:

- Cargas debido a la masa (o peso) propio/a de los componentes de la línea (torre, cables, conectores, aisladores, etc.)
- Cargas debidas a eventos climáticos: viento, temperaturas extremas, hielo.
- Cargas por maniobras de tendido durante la construcción.
- Cargas por mantenimiento.
- Sismo.

Las cargas a las cuales se hace referencia anteriormente son afectadas por factores y combinaciones de carga en función del tipo de torre y nivel de tensión (como se menciona en el siguiente punto) y actúan a nivel de la estructura transmitiéndose a la cimentación.

### Soluciones con base a cimentaciones superficiales

Este tipo de cimentaciones se refiere a zapatas, losas y cajones de cimentación, muertos de anclaje, retenidas o cimentaciones ancladas. En la Figura 3 se muestra una torre de transmisión sobre zapatas aisladas. Algunas soluciones innovadoras propuestas con cimentaciones superficiales en torres de transmisión se comentan a continuación:

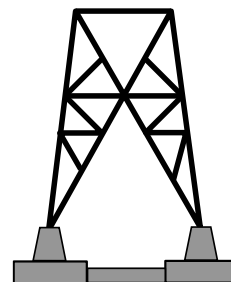


Figura 3. Cimentación superficial a base de zapatas aisladas en una torre de transmisión eléctrica tipo.

En un estudio realizado por Guerrero y Melchor (2000) se analizaron torres de transmisión con diferente nivel de tensión para suelos cohesivos y friccionantes, tomando en cuenta condiciones de suelo húmedo y sumergido con el fin de normalizar las condiciones del suelo en este tipo de cimentaciones superficiales. Este estudio propuso que para este tipo de suelo y condiciones es recomendable el uso de zapatas, con las recomendaciones que los lados de las zapatas deben ser paralelos a la dirección de la línea de transmisión y cuando se encuentren rotadas deben tener un ángulo de  $45^\circ$  con respecto a dicha dirección.

Por otra parte, tomando en cuenta las mismas consideraciones con relación a la estructura pero tratándose de estratos rocosos el estudio propone el uso de pilones anclados, pudiendo ser estos verticales o patas de elefantes.

Howes y Dampsey (1993) comentaron sobre colapsos en líneas de transmisión en Australia, asociadas a tormentas severas. Se mencionaron 19 colapsos de torres en un periodo de 42 años, de los cuales 5 fueron provocados por tornados y 10 por tormentas severas. En una tormenta severa, se presentó la aparición de vientos descendentes, que se movieron en traslación sobre zonas de baja presión, que afectaron a zonas de tipo elíptico. Al descender las masas de aire, se produjeron vientos radiales a partir de la zona de baja presión, que indujeron anillos vorticosos al chocar con el suelo. Se trasladó la zona de baja presión a lo largo de una trayectoria, debido a las condiciones en la zona central de la tropósfera.

Rodríguez *et al.* (2002) tomó los datos de la investigación anterior y los comparó con los datos que se tienen de la Ciudad de México de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias (2004) y el manual de diseño por sismo, lo que le permite definir criterios para lograr la estabilidad de torres de transmisión altas, apoyadas sobre terreno muy deformable. Con esta investigación se logra establecer una metodología para dimensionar la cimentación formada por ataguías metálicas y losa superficial para apoyo de las torres a partir de los datos geotécnicos necesarios y la revisión de la estabilidad de las torres.

Una investigación realizada por Yanhui You, *et al.* (2016) plantea que la estabilidad de las cimentaciones de las torres en las regiones de donde se encuentra una capa de hielo permanente del suelo está relacionada con el régimen térmico de los suelos adyacentes, por lo que se plantea la evolución de la temperatura del suelo en el relleno de la cimentación de una torre, que se construye mediante excavación abierta en la meseta Qinghai-Tíbet.

Durante tres años posteriores a la construcción de la torre se estuvieron monitoreando la temperatura del suelo y el contenido de agua en el relleno, obteniendo como resultado que la construcción en el invierno dio lugar a una menor temperatura inicial del suelo alrededor de las zapatas de la torre, y la convección natural potencial en el relleno suelto, lo que facilitó el enfriamiento en el primer invierno. En el verano siguiente, la temperatura en el relleno fue mayor que en un campo natural cercano, debido al calor latente

del agua de infiltración en el relleno y al calentamiento de los suelos más cálidos y no alterados. Los eventos de infiltración de agua llevaron a una tasa de calentamiento de una a dos veces más alta que la de la conducción térmica en el relleno. Mientras que, después de un año del proceso de congelación y descongelación del suelo la transferencia de calor dominante cambió a conducción de calor en el relleno compactado.

Otro estudio basado en la zona Qinghai-Tíbet es realizado por LeiGuo, *et al.* (2016) sobre desplazamientos en zapatas de torres de transmisión que presenta formaciones de capas de hielo. Para este estudio se seleccionaron 130 cimentaciones para observar los desplazamientos en la base de la cimentación.

Con base en la observación se analizaron las características que presentaban las pilas y los resultados mostraron que predominaba el desplazamiento vertical de las zapatas, mientras que los cambios en la distancia entre dos zapatas y la diferencia en el desplazamiento vertical era relativamente pequeño. El desplazamiento vertical de la mayoría de las zapatas funcionaba como asentamiento en lugar de levantamientos por la presencia de hielo. Debido al enfriamiento efectivo de los termosifones el empuje hacia arriba por el hielo se produjo principalmente en temporadas de frío.

En terrenos con pendiente, el movimiento descendente (deslizamiento) de los suelos de la capa activa dio como resultado una considerable distancia horizontal entre dos cimientos de la torre. La diferencia en la distancia vertical entre dos zapatas de torre adyacentes podría derivarse de la elevación de las cimentaciones de las torres con termosifones y la migración de agua bajo la superficie. El efecto de este último fue más fuerte, especialmente cuando el agua resultó en el desarrollo de la formación de hielo en el suelo.

Siguiendo con el eje del diseño de las cimentaciones superficiales un estudio realizado por Guanglin, *et al.* (2018) muestra el diseño de una torre de transmisión de 220 kVa escala 1:5 a base de losas de cimentación híbridas. El modelo fue sometido al movimiento horizontal de la superficie bajo condiciones normales de trabajo para determinar la estabilidad de la torre.

Las deformaciones del modelo de torre probado y las tensiones y deformaciones dentro de los diferentes miembros estructurales de la torre y la losa de concreto armado de la cimentación se midieron, generando una gran cantidad de datos de prueba integrales. La investigación indicó claramente que, en comparación con la base de la pata de la torre aislada, la base de la losa híbrida propuesta tiene una resistencia muy buena, en términos de deformaciones y tensiones de los miembros del entramado, al movimiento del terreno.

La investigación de Guo *et al.*, (2018) plantearon que durante la construcción de una línea de transmisión de corriente continua de 400 kV a base de zapatas se encontraron bloques congelados en la cimentación debido a la falta de material de relleno, dando lugar a un menor grado de compactación del terreno. Con el propósito de garantizar la estabilidad de las cimentaciones se instalaron termosifones para analizar la amenaza que puede causar a la cimentación la infiltración del agua a los vacíos del suelo por los bloques congelados, de igual forma estos sensores cuantifican la eficacia de una combinación de termosifones y cubierta vegetal para otorgarle una mayor estabilidad a la torre.

Los resultados mostrados en esta investigación indicaron que los efectos de enfriamiento de los termosifones causaron una gran cantidad de eliminación neta del calor de los suelos, mientras que el terreno donde no se colocaron los termosifones presentaron una mayor incidencia del calor.

La acumulación en los pozos y la infiltración del agua funcionaron para calentar el suelo donde se encontraban desplantadas las cimentaciones, dando como resultado el asentamiento de los cimientos de las torres. La combinación de termosifones y cubierta de vegetación se muestra para enfriar eficazmente el suelo donde está desplantada la zapata, reduciendo el asentamiento, asegurando la estabilidad de la estructura.

Este estudio también muestra que el relleno de bloques congelados debe evitarse en las condiciones climáticas actuales, aunque se usan medidas de enfriamiento efectivas como termosifones porque la infiltración descendente de agua a lo largo de los grandes huecos entre los bloques congelados no se

puede evitar por completo. Si continúa la degradación actual del estado de congelación de los suelos rellenados, el agua infiltrada, que se ha congelado en la parte inferior del relleno, comenzará a descongelarse nuevamente, amenazando la estabilidad de los cimientos de la torre.

La propuesta de cimentaciones superficiales en torres de transmisión debe considerar el efecto de varios factores adicionales a la capacidad de carga del terreno. Especial cuidado debe tenerse en zonas de bajas temperaturas donde el agua en el subsuelo puede congelarse y causar problemas geotécnicos importantes durante los procesos de congelamiento y deshielo. La colocación de termosifones y cubierta vegetal en la zona de cimentación ha mostrado ser una solución viable que evita problemas de estabilidad en las torres de transmisión con este tipo de cimentación.

### Soluciones con base a cimentaciones profundas

Este tipo de cimentaciones se refiere a pilas de concreto reforzado, pilotes de acero, micropilotes y cualquier sistema de cimentación que transmita la carga de la torre de transmisión a estratos profundos más competentes. En la Figura 4 se muestra una torre de transmisión sobre pilas. Algunas soluciones innovadoras propuestas con cimentaciones profundas en torres de transmisión se comentan a continuación:

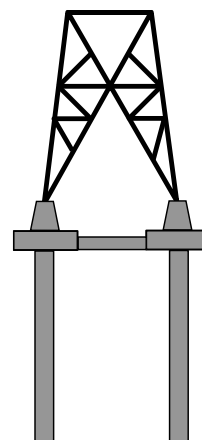


Figura 4. Cimentación profunda a base de pilas en una torre de transmisión eléctrica tipo.

En un informe técnico elaborado por Rangel, *et al.* (2007) sobre el análisis y diseño geotécnico-

estructural de las cimentaciones de torres para la línea de transmisión de 230 kV Altamira-Cd. Madero en el estado de Tamaulipas. Aquí se encontraron torres que debían ser desplantadas en zonas de lagunas, pantanos y zonas de manglar.

Atendiendo a las acciones mecánicas y particularmente a los momentos de volteo grandes que soportarían las torres, fue necesario recurrir a cimentaciones profundas cuyo trabajo sea mediante la fricción desarrollada en su fuste y el aporte de la punta empotrada en los estratos arenosos competentes. Dada la presencia de las lagunas y pantanos, fue necesario realizar plataformas de acceso y maniobra para instalar los elementos de la cimentación.

La solución mediante pilotes de fricción fue factible pero implicó la construcción de plataformas de mayor área para los equipos de instalación. Por lo anterior, se contempló como solución pilas de concreto reforzado coladas *in situ*, las cuales se construyeron con equipo ligero que reduce significativamente los volúmenes para las plataformas de acceso y maniobra. Las pilas de cimentación fueron de 60 cm de diámetro dispuestas individualmente o en grupo bajo las patas de las torres y unidas en su cabeza por trabes de liga bajo las patas. Se contempló soluciones con una sola pila bajo las patas, con grupos de dos pilas y de tres pilas.

El Código chino para el diseño de cimentaciones de torres de transmisión presenta algunos inconvenientes relacionado con el empleo de cimentaciones profundas que deben estudiarse, por lo que Hao *et al.* (2012) propusieron una investigación sobre las cimentaciones a base de pilas en suelos rígidos empleando método de elementos finitos para simular el comportamiento de pilas en suelos no perturbados y comparando los resultados del análisis con elemento finito con los resultados determinados con el código chino. Además, los efectos de la profundidad de empotramiento, las propiedades del suelo, el ángulo de la base en el modo de falla y la capacidad máxima se investigaron por medio de un análisis paramétrico.

Los resultados de la investigación indicaron que el ángulo de fricción interna tiene efectos significativos sobre el deslizamiento de la superficie y la cohesión

afecta ligeramente la forma de la superficie deslizante. Por otra parte, un ángulo de 45° corresponde a un deslizamiento de la superficie mayor y presenta una mayor resistencia al volteo en comparación con otros ángulos de fricción interna.

La zona Qinghai-Tibet es conocida por la formación de hielo en los estratos del suelo, por lo que Yanhui *et al.* (2016) propusieron una investigación sobre la formación de hielo cerca de cimentaciones a base de pilas a lo largo de una línea de transmisión en esa zona.

La pila de cimentación de la torre estudiada se encuentra ubicada en la primera terraza fluvial del río Tuotuohe. Se identificaron capas del suelo con presencia de hielo, con una temperatura aproximada -0.05 ° C y con un espesor de 5 m con presencia de agua subterránea. Estas condiciones son propicias para la formación de hielo en el suelo. La incrustación de los cimientos de pilotes y la conexión subsiguiente del agua bajo la capa de hielo son las principales causas de la formación de hielo.

En los siguientes procesos de congelación-descongelación, debido al enfriamiento por termosifones instalados muy cerca de la cimentación de la torre, la recongelación de la tierra impidió la descarga del agua bajo el hielo. La hidrodinámica relacionada con el crecimiento de la formación de hielo en el suelo impactó la mayor parte del área con pilas incrustadas, que pueden influir en la fuerza de adhesión, la fuerza de fricción y la estabilidad de la cimentación de la torre. En el contexto del calentamiento climático, los glaseados de tierra secundarios pueden volverse más peligrosos para la línea de energía de la capa de hielo. La congelación del suelo alrededor de la cimentación de la torre o la disminución de la capa freática pueden ser métodos efectivos para mitigar la reincidencia de la formación de hielo en el suelo.

De lo anterior podemos comentar que se requieren estudios geotécnicos especiales cuando se desplantan las torres de transmisión en zonas de baja capacidad de carga, como puede ser pantanos, lagunas o manglares. Aquí se propuso el uso de pilas de concreto reforzado que transfirieron la carga por fricción y/o por punta. También se muestra el caso de líneas de transmisión en zonas de bajas temperatura,

en la cual se recomienda el uso de termosifones, los cuales evitan el descongelamiento del agua que pudiera causar pérdida de capacidad del suelo y, en consecuencia, de estabilidad en la torre de transmisión.

### **Casos de cimentaciones en laderas.**

Estudios reflejan que existen muchas torres de transmisión que se encuentran en áreas montañosas debido las limitaciones con el uso del suelo. Las fallas en la pendiente y el daño a las torres de transmisión ubicadas en las pendientes son generadas principalmente por fuertes lluvias, factores geológicos y el mal diseño de cimentaciones. Estos desastres pueden causar no solo pérdidas económicas graves sino también humanas. A partir de esto surge la necesidad de realizar estudios para estudiar el comportamiento de las cimentaciones ubicadas en laderas.

Kim *et al.* (2016) plantearon desarrollar un programa para simular la estabilidad de taludes para torres de transmisión. Varios programas de estabilidad de taludes han sido desarrollados (por ejemplo, GeoStudio y Talen); sin embargo, los programas comerciales que existen para la simulación numérica de la estabilidad de taludes considerando la cimentación no consideran los efectos de la presencia de una transmisión. En este estudio, se empleó un programa de análisis de estabilidad de taludes que toma en cuenta la presencia de una torre de transmisión de energía, conocido como KISS (KAIST Integrated Slope Stability), y se verificó con un caso real de falla de una ladera. Con la localización del sitio de prueba se analizó por el programa KISS, y se encontró que las posiciones de las pilas no se vieron afectadas por un aumento en el factor de seguridad.

La posición óptima de la pila se determinó en un estudio paramétrico utilizando el banco de pruebas. La posición de pila sugerida aumenta la estabilidad de la pendiente al inducir fuerza de resistencia en el área propensa a la falla de la ladera.

Por lo cual, podemos concluir que, en caso de tener torres de transmisión eléctrica en zonas de laderas, no es suficiente con analizarlo con cualquier programa de estabilidad de taludes. Deberá incluirse

la influencia que tiene sobre la estabilidad del talud, las fuerzas inducidas por la torre de transmisión.

### **Soluciones alternativas de cimentaciones.**

El Sunrise Powerlink es una nueva línea de transmisión de 188km y 500 kV capaz de transportar 1,000 megavatios de energía renovable desde Imperial Valley a San Diego, CA, EU. En total, 13,200 toneladas de acero, 1827km de cables aéreos de alta tensión, 19573 metros cúbicos de concreto y más de 5,4 millones de horas de trabajo se utilizaron para completar el proyecto. La alineación se ejecutó a través de varios terrenos de difícil acceso y ambientalmente sensibles, que incluyen el desierto, las montañas, el territorio de Ovejas de Cuerno Grande y National Forest Land. (Environmental Impact Statement: The Sunrise Powerlink Final Environmental Impact Report, 2008). De un total de 438 ubicaciones de torres 235 se consideraron como sitios de construcción sólo para helicópteros y requirieron una solución de cimentación alternativa, por lo que se seleccionaron cimientos de micropilotes. Los cimientos de micropilotes para torres de celosía han utilizado tradicionalmente casquillos de pilotes de concreto colado *in situ*.

Para este proyecto en particular se consideraron las tapas de pilotes de acero como una alternativa para promover las ventajas facilidad de proceso constructivo para los sitios de torres limitados por ventanas de oportunidad ambientales cortas. El proyecto cruzó tres regiones principales; desiertos, montaña y mar costera desde El Centro, hasta El Cajón, CA. Las especificaciones de diseño requerían un método de protección contra la corrosión comparable al de la cubierta de concreto, suficiente para soportar el potencial de suelos agresivos en el desierto, así como el aire salino corrosivo de los ambientes cercanos al mar.

Las especificaciones también requirieron una vida de diseño de 75 años. El método de protección contra la corrosión también necesitaba proporcionar resistencia en el caso de un enterramiento parcial durante cortos períodos de tiempo, ya que muchas de las cimentaciones se encuentran en laderas empinadas. La dificultad de acceso a los sitios remotos en las regiones montañosas y las estrictiones ambientales a lo largo de todo el alineamiento requirieron un diseño de cimentación y

un método de protección contra la corrosión que podría mantenerse sin mantenimiento en un intervalo programado más largo.

Un estudio realizado por Guang-Lin *et al.* (2009) sobre el uso de zapatas independientes y compuestas de torres de transmisión en una zona minera que presenta hundimientos del suelo muestra el contraste en el rendimiento anti-deformación por medio del estudio de elementos finitos. Los resultados de la investigación indicaron que el suelo se deformó cuando se presentaron curvaturas negativas a tensión o compresión.

La tensión estructural y los desplazamientos horizontales de las torres de transmisión pueden reducirse en un 25% y 40% respectivamente por el uso de cimentaciones de material compuesto en comparación de zapatas independientes. Si el suelo se deforma siguiendo un patrón de curvatura positiva la torre puede ser protegida mediante el uso de zapatas compuestas en lugar de usar zapatas independientes. Los resultados propusieron una base para mejorar el método de diseño de los cimientos empleados en las torres de transmisión en zonas mineras obtenidas realizando simulaciones numéricas.

Dentro de las soluciones alternativas de cimentación en torres de transmisión se consideraron micropilotes y la solución a base de materiales resistentes a corrosión que permita que la torre de transmisión tenga periodos de vida útil de 75 años. Además, se determinó la importancia de colocar cimentaciones compuestas en zonas donde se esperan deformaciones importantes del suelo que pueden causar inestabilidad de la estructura en caso de colocar zapatas aisladas.

## CONCLUSIONES

Las investigaciones mostradas en este artículo sirven como base para proporcionar referencias valiosas en el diseño de cimentaciones de torres de transmisión en diferentes condiciones de suelo, así como definir criterios para lograr la estabilidad de torres de transmisión.

De igual forma se presentaron estudios donde se simularon cimentaciones por el método de elementos finitos obteniendo resultados más precisos ya que se

pueden estudiar el comportamiento real de una cimentación ante presencia de diferentes condiciones de cargas.

Este estudio muestra un campo amplio sobre el estudio de las cimentaciones de torres de transmisión eléctrica y como se pueden encontrar un sin número de variables que se tienen que considerar para lograr un diseño geotécnico óptimo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Barragán, A. 2013. “Análisis de una torre de transmisión eléctrica ante efectos de viento atmosférico y de tromba: relación del costo de la torre en función de la velocidad del viento” Universidad Autónoma de México. Facultad de Ingeniería.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE), Especificación JA100-64 (2011) “Cimentaciones para estructuras de líneas de transmisión”.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE), Especificación JA1000-50 (2016) “Torres para líneas de transmisión y subtransmisión”.
- Guang-Lin, Shi-Ming, Guo-An, Wei, Yun-Fei y Qian-Jin. 2009. “The anti-deformation performance of composite foundation of transmission tower in mining subsidence area”. The 6<sup>th</sup> International Conference on Mining Science and Technology. *Procedia Earth and Planetary Science* 1 (2009) 571-576.
- Guerrero-F, Vy Melchor-G, N. 2000. “Normalización de cimentaciones superficiales para torres de transmisión”. Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- Guo, X., Yu Y., Wang y Li. 2016. “Displacements of tower foundations in permafrost regions along the Qinghai–Tibet Power Transmission Line”. *Cold Regions Science and Technology*. 121: 187-195.
- Guo, Zhang, Wang, Yu, You, Yuang, Xiey Gou. 2018. “Stability analysis of transmission tower foundations in permafrost equipped with thermosiphons and vegetation cover on the Qinghai-Tibet Plateau”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 121: 367-376.
- Hao, Chen y Fan. 2012. “Ultimate Uplift Capacity of Transmission Tower Foundation in Undisturbed Excavated Soil”. 2012 International Conference on Future Electrical Power and Energy Systems. *Energy Procedia* 17 (2012) 1209 – 1216.



- Howes, H. y Dampsey, D. 1993. “Review of recent Australian transmission line failures due to high intensity winds”, Workshop on High Intensity Winds on Transmission lines, Buenos Aires, Argentina.
- Rangel, J.L, e Ibarra, E. 2007. “Diseño geotécnico-estructural para cimentaciones de torres de la línea de transmisión de 230 kV Puerto Altamira”. Informe definitivo, Enero 2007.
- Rodríguez-C, N., López-G, J.y Flores-V, R. 2002. “Estabilidad de torres de transmisión cimentadas sobre terrenos de baja capacidad”. XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Puebla, México.
- You, Yu, Guo, Wang, Qian y Zhang. 2016. “In-situ monitoring the thermal regime of foundation backfill of a power transmission line tower in permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau”. *Applied Thermal Engineering*. 98: 271-279.
- You, Yu, Wang, Li y Yue. 2016. “Investigation of an icing near a tower foundation along the Qinghai–Tibet Power Transmission Line”. *Cold Regions Science and Technology*. 121: 250-257.
- Yuan, Yang, Huang y Tan. 2018. “Experimental study on the stability of the transmission tower with hybrid slab foundation”. *Engineering Structures*. 162: 151-165.