

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL
LITORAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD
Y COMPUTACIÓN**

MATERIA:

LÍNEAS DE TRANSMISIÓN Y SUBESTACIONES

GRUPO:

3

PROYECTO:

ESTRUCTURAS DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

INTEGRANTES:

CÉSAR AGUILAR

JOHANNA BONILLA

JONATHAN RIERA

Contenido

INTRODUCCIÓN	1
TIPOS DE DISEÑOS DE ESTRUCTURAS	2
MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TORRES	4
ESTRUCTURAS DE ACERO	4
ESTRUCTURAS DE ALUMINIO	4
ESTRUCTURAS DE FIBRA DE VIDRIO	4
ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN	5
TORRES DE CELOSÍA	5
ESTRUCTURAS SEMIFLEXIBLES	7
POSTES METÁLICOS	9
POSTES MORELOS	11
ESTRUCTURAS FORMADAS POR POSTES DE MADERA	12
ESFUERZOS DE LAS ESTRUCTURAS	13
EFECTOS DEL VIENTO	13
CARGAS POR PESO PROPIO	13
CARGAS POR EFECTO DEL HIELO	13
CARGAS POR CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO	13
CARGAS POR TENDIDO Y TENSADO	14
ESFUERZOS SOBRE LA CIMENTACIÓN	14
CÁLCULO DE LAS CARGAS	15
CÁLCULO DE LA FLECHA Y VANO	16
GUÍA PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	17
DISEÑO CONVENCIONAL	18
DETALLES PARA LA PREPARACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN	19
LOCALIZACIÓN	19
COLOCACIÓN DE TORRES	19
COLOCACIÓN DE TORRES USANDO HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES	20
CONCLUSIONES	22
REFERENCIAS	23

INTRODUCCIÓN

Para poder transportar energía eléctrica, se utilizan comúnmente líneas de transmisión aéreas debido a los beneficios de costo, normalización y operación que estas representan.

Debido al gran peso de las líneas de transmisión, su soporte tiene que ser realizado por estructuras cuya fortaleza sea la adecuada para soportar los esfuerzos mecánicos inclusive en condiciones climatológicas difíciles, sin embargo deben de proveer la ventaja de abaratar los costos. Para esto, las torres de las líneas de transmisión son de formas muy variadas dependiendo de su uso y el lugar donde vayan a ser colocadas.

En este trabajo se espera dejar en claro la labor de las torres en las líneas de transmisión, justificar mediante ecuaciones los esfuerzos a los que son sometidas las torres de las líneas de transmisión, dar pequeños directrices sobre el diseño adecuado de las torres para las líneas de transmisión y mostrar la variedad de diseños posibles que se pueden encontrar alrededor del mundo.

TIPOS DE DISEÑOS DE ESTRUCTURAS

Debido a su tamaño, las estructuras que soportan las líneas de transmisión son normalmente el elemento más visto en los sistemas eléctricos de potencia. Ellos soportan los conductores que transportan la energía eléctrica desde la generación hasta las subestaciones para que la energía pueda ser distribuida a los consumidores. Las líneas de transmisión transportan energía eléctrica a altos voltajes, normalmente mayores a 115kV.

El tipo de estructuras a utilizar para el diseño y en consecuencia la construcción de una Línea de Transmisión aérea, depende principalmente:

- Del nivel de tensión eléctrica de operación
- Calibre del conductor a ser instalado
- Cantidad de circuitos necesarios para el enlace a la red eléctrica
- Disposición de fases en el espacio
- Los costos o presupuesto destinado para su construcción
- Zonas por donde pasará la trayectoria de la Línea de Transmisión.

Hay muchas estructuras que sirven para soportar los conductores, pero generalmente están divididas en dos principales grupos:

Postes Metálicos Tubulares: Postes fabricados como una sola pieza o pueden ser fabricados en varias secciones para luego ser ensambladas.

Torres Metálicas: Construidas pieza a pieza de celosía de acero y ensambladas en el lugar donde van a ser colocadas.

Ambos diseños típicos pueden ser de circuito simple, doble circuito, o de varios conductores agrupados.

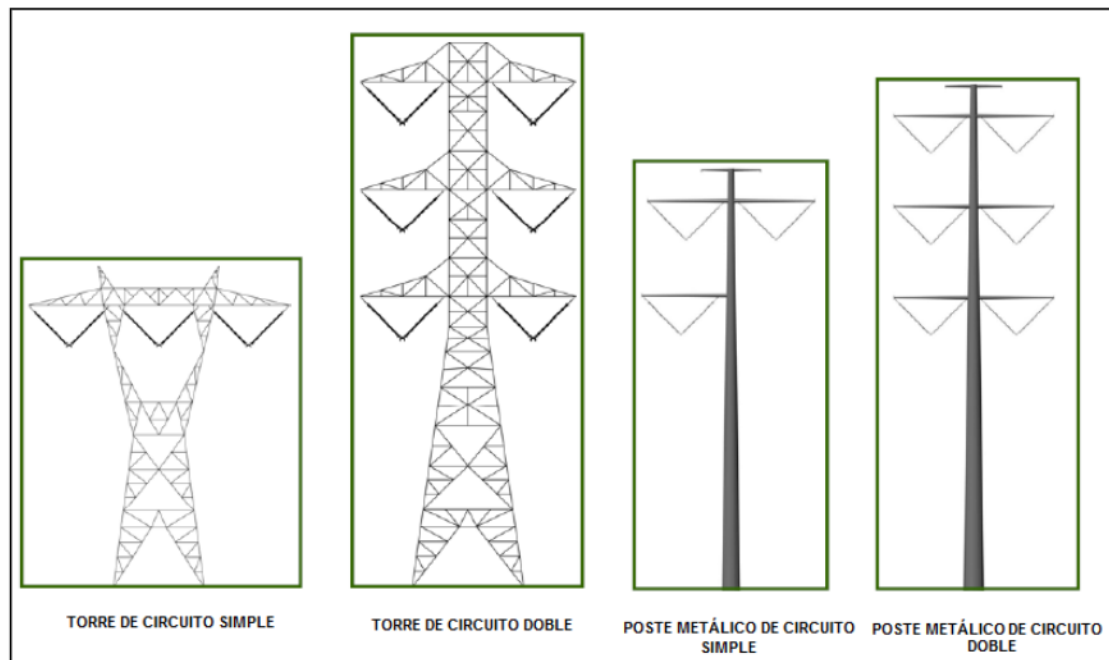


FIG. 1. ESTRUCTURAS PRINCIPALES

Sin embargo se va a realizar una clasificación más detallada a continuación:

Por materiales

- Torres de celosía de acero
- Postes de acero
- Estructuras H de madera
- Torres de hormigón
- Torres de acero rellenas de hormigón

Disposición de los conductores

- Torre en pórtico
- Torre Delta
- Torre de simple circuito
- Torre de doble circuito
- Torre de triple circuito
- Torre unipolar

Ubicaciones específicas

- Pequeñas torres sobre techo o paredes de edificaciones.
- Torre de cruce
- Estructuras montadas sobre puentes, como en el puente Storstrøm

Propósitos específicos

- Torre para ferrocarril
- Torre híbrida, usadas tanto para distribución eléctrica como para tracción ferroviaria.

MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TORRES

Los materiales normalmente usados para la fabricación de estructuras para Líneas de Transmisión de energía eléctrica son el acero, el concreto y la madera. Aunque, existen otros tipos de materiales como la fibra de vidrio, el aluminio y algunos compuestos con polímeros y silicón (polysil), los cuales permiten que el diseño de las estructuras de transmisión minimicen el impacto ambiental y reduzcan el ancho de derecho de vía para aplicaciones en sistemas de transmisión, subtransmisión y distribución, así mismo como alivian las cargas.

ESTRUCTURAS DE ACERO

Dentro de la clasificación de estructuras de acero se encuentran:

- Torres auto-soportadas
- Torres con retenidas
- Postes troncocónicos
- Postes Morelos y tipo Independencia
- Marcos de remate

ESTRUCTURAS DE ALUMINIO

No requieren ser galvanizados, debido a que el aluminio presenta mejores características de resistencia ante condiciones atmosféricas corrosivas. Las configuraciones y los detalles estructurales de diseño son prácticamente los mismos que las torres de acero, sin embargo, presentan problemas de mayor deformación originadas por las tensiones mecánicas debido al bajo modulo de elasticidad del aluminio. Las estructuras de aluminio son más ligeras y fáciles de instalar en comparación con las de acero. Su mantenimiento es más barato que el de las torres de acero.

ESTRUCTURAS DE FIBRA DE VIDRIO

La mayor aplicación que se le ha encontrado a la fibra de vidrio en los últimos años, ha sido en estructuras de transmisión de energía eléctrica tales como; postes de transmisión, distribución, crucetas y brazos en "X" para estructuras en configuración "H".

Características:

Son un excelente aislador, incluso bajo condiciones climatológicas con lluvia.

Los postes de transmisión con fibra de vidrio tienen un coeficiente mayor de rigidez-peso que el acero, madera o concreto y sustancialmente son más ligeros, es decir, aproximadamente 30% el peso de la madera, el 60% del acero y el 15% o menos del concreto.

En promedio, el costo de un poste es aproximadamente un tercio más caro que el de un poste de madera. Por lo que, se espera que el ahorro en mantenimiento y otras ventajas adicionales amorticen el gasto inicial.

ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Sus diseños y empleos son similares a los que se acostumbran en las estructuras hechas de postes de madera o sea que pueden ser utilizados desde voltajes de media tensión hasta 115 kV; conformando estructuras denominadas “tipo H” y “tipo K” para su uso en suspensión y tensión, respectivamente.

TORRES DE CELOSÍA

Las estructuras pueden soportar los circuitos individuales, dobles, o múltiples. Los dos primeros tipos se utilizan generalmente para las líneas de transmisión, excepto en las zonas congestionadas donde el derecho de vía es muy caro y se desea transmitir grandes bloques de potencia sobre una línea. En tal caso tres o más circuitos pueden ser soportados por las estructuras.

Estructuras auto-soportadas o rígidas.

En ambos tipos de torres, de uno o dos circuitos, de considerable longitud, se cree necesario por razones económicas, al menos tres tipos de torres:

1. Una torre de suspensión tangente que puede ser utilizada para tramos monótonos donde no hay desviaciones en la ruta de la línea.
2. Una torre de suspensión angular que puede ser utilizada para vanos normales con un pequeño giro de ángulo en la línea o con mayor vano por la tangente.
3. Una torre de ángulo que puede ser utilizado para vanos normales con un gran ángulo de giro en la línea, con vanos largos en la tangente, o como una estructura terminal con anclaje de la torre. Los aislantes pueden estar suspendidos o en la posición de la cepa.

Muy a menudo es deseable introducir un cuarto tipo de torre con aisladores siempre en los puntos de mayor tensión, donde haya un gran ángulo de giro de la línea, en vanos muy largos en la tangente; y también, cuando sea necesario, como una torre terminal. Cuando este tipo de torre está en la línea, la torre listada en el punto 3 puede ser de una construcción más ligera, y no se utilizan estructuras terminales.

La forma de estas torres ha sido desarrollada para obtener el menor peso de acero requerido en la superestructura y así disminuir la cantidad de patas o extensiones para minimizar el efecto de la torsión. La teoría detrás de estas torres es que los momentos de torque más grandes que podrían ser causados por una combinación de fuerzas transversales y longitudinales debido a conductores rotos, actuando simultáneamente, los cuales producen una fuerza resultante en un ángulo de aproximadamente 45° con la dirección de la línea. En este caso las cuatro piernas de la torre están resistiendo el momento de torsión, y así reducen la generación de nuevas cargas y consecuentemente de costos. Bajo condiciones normales, con solamente fuerzas transversales actuando, las piernas en la diagonal, que se encuentran muy separadas, se hacen cargo del momento de

torsión. Obviamente la mayor ventaja de este tipo de torres es que cuando esta torre es utilizada para tangentes o pequeños ángulos, las fuerzas transversales y longitudinales son aproximadamente iguales.

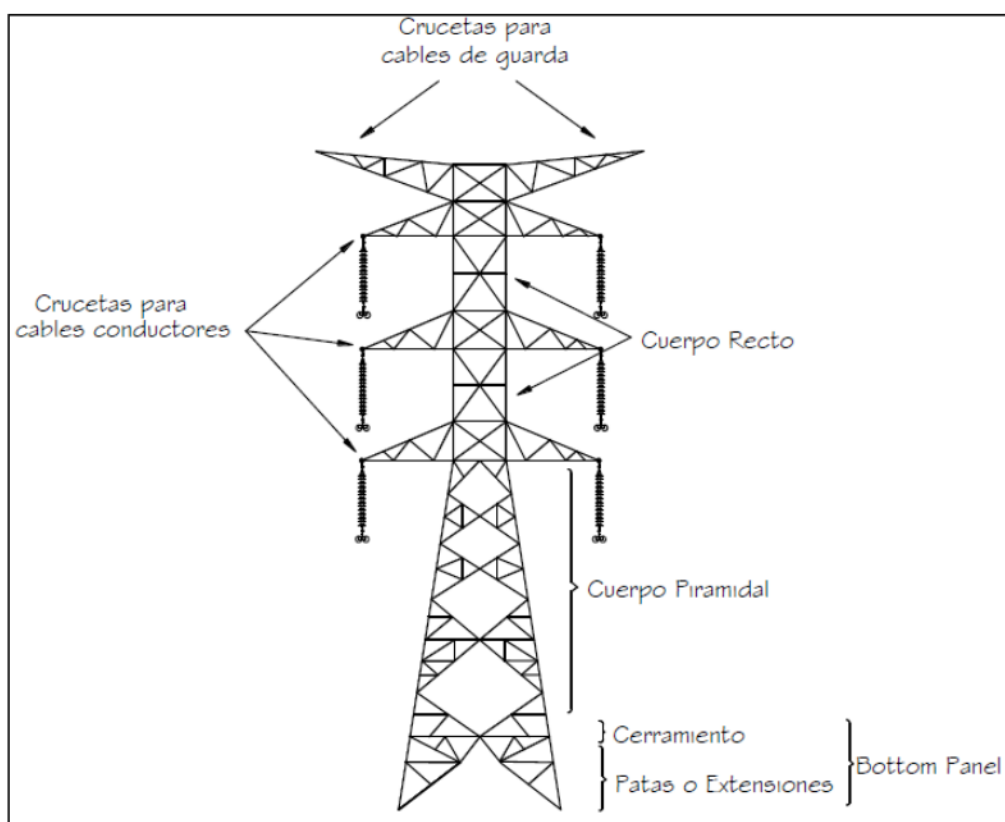
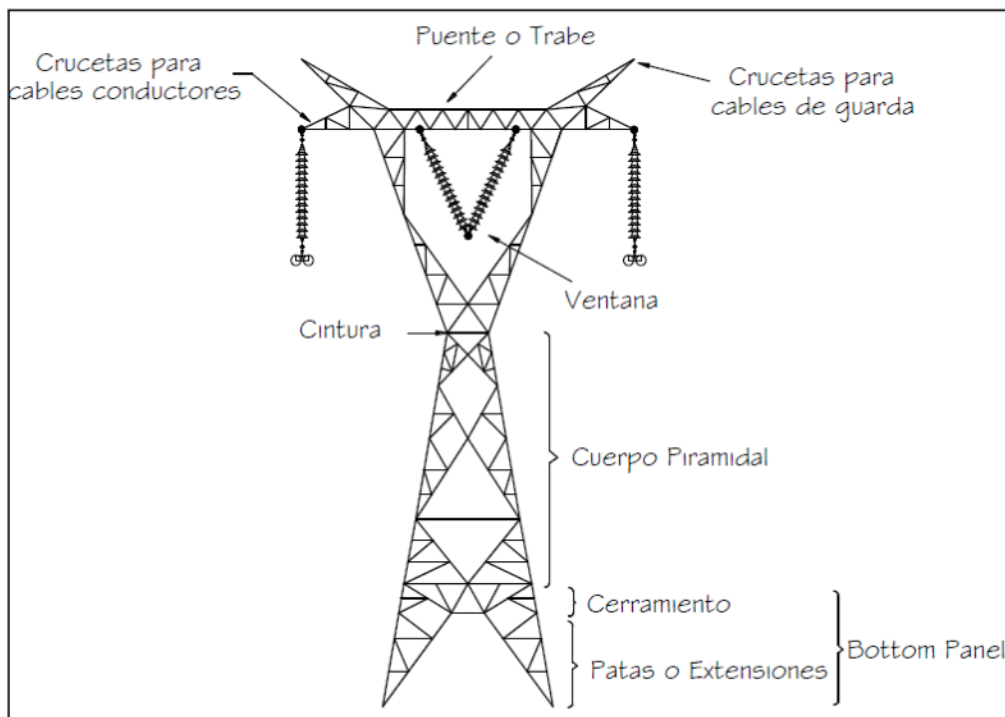


FIG. 2 PARTES DE LAS TORRES DE CELOSÍA

Del mismo tipo de torre mostrada anteriormente también existe un modelo usado por la empresa *Bonneville Power Administration* mostrado en la siguiente figura. Este modelo pueden ser usados para resistir hasta vientos de 100 mi/h y nieves de hasta 1,5 pulgadas.

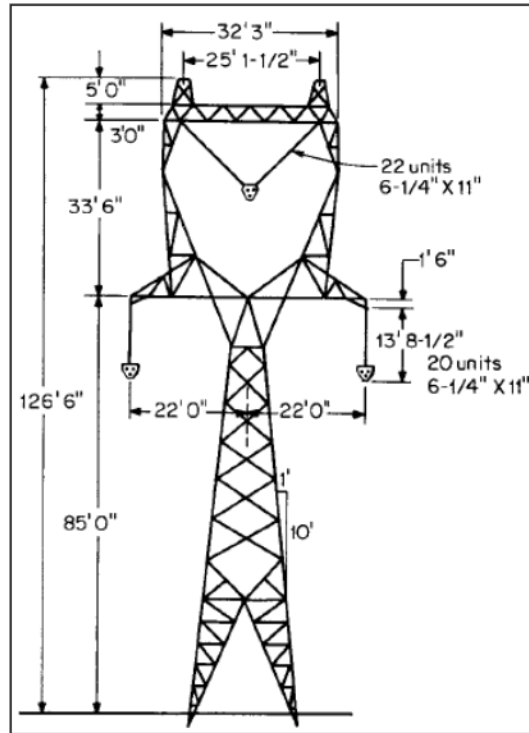


FIG. 3 TORRES USADAS POR BPA

ESTRUCTURAS SEMIFLEXIBLES

Las "torres de retenidas" son estructuras formadas por celosía (enrejado) de acero, que para soportar su propio peso y las fuerzas ejercidas por los cables conductores y de guarda, requieren de cables anclados al terreno, denominados "retenidas".

Las torres de retenidas son de dimensiones robustas, peso ligero y requieren de constante mantenimiento. El uso de este tipo de estructuras inicio en los años 30's con forma de "H" denominadas "tipo portal".

En años posteriores se introdujo el uso de torres en forma de "V", y raramente se ha usado torres en forma de "Y". La aplicación de torres con retenidas es común para líneas largas de sólo un circuito, especialmente para terreno plano y accesible, por razones económicas y de estética. Para el uso de estas torres en zonas agrícolas se debe prever el refuerzo de anclas en la cimentación para minimizar el daño por impacto de la maquinaria agrícola.

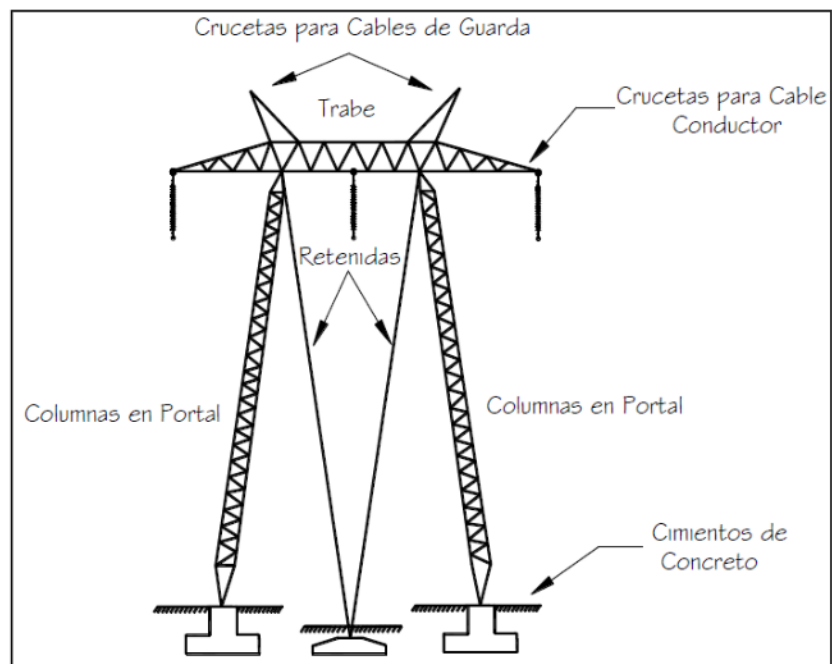


FIG. 4 TORRE DE RETENIDA TIPO PORTAL

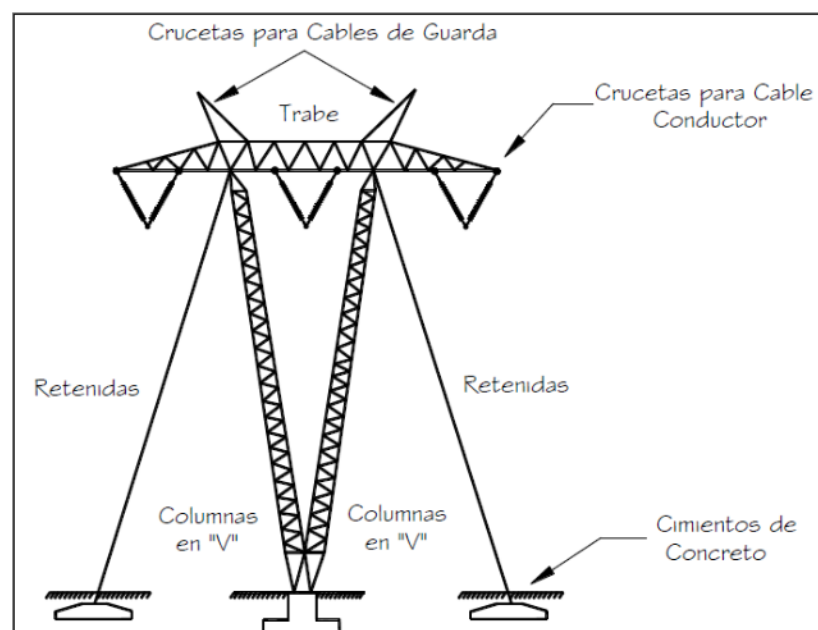


FIG. 5 TORRE DE RETENIDA EN V

POSTES METÁLICOS

La utilización de los postes se da cuando la línea de transmisión pasa a lo largo de áreas congestionadas donde el derecho de vía es muy pequeño. Son utilizados para voltajes mayores a 345KV sin problemas. Son estructuras aplicadas para minimizar el impacto visual de las instalaciones. Los aisladores pueden ser tipo poste, cadena de aisladores o una combinación de los dos. Es importante considerar que los proyectos de líneas de transmisión con postes son de alto costo de inversión.

Las partes principales que conforman a un poste troncocónico son las siguientes:

- Tapa
- Brazos o crucetas
- Cañas
- Escalones
- Placa base

En las Figuras se ilustran las partes principales de los postes troncocónicos, incluyendo el tipo lindero y transición

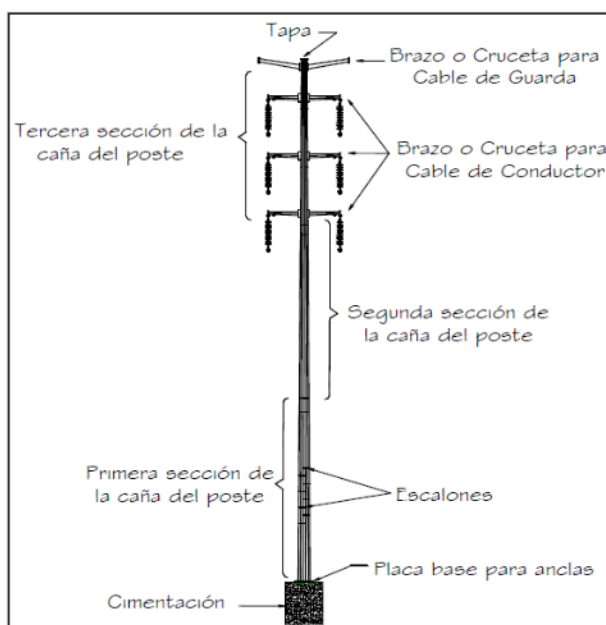


FIG. 6 POSTE TRONCOCÓNICO

Cuando el diseño de los postes contempla la posición de los circuitos de un solo lado, se les conoce como postes "tipo lindero". Otra variedad del uso de estos postes es para realizar transiciones de cable aéreo a cable aislado de potencia subterráneos, denominados "postes de transición"

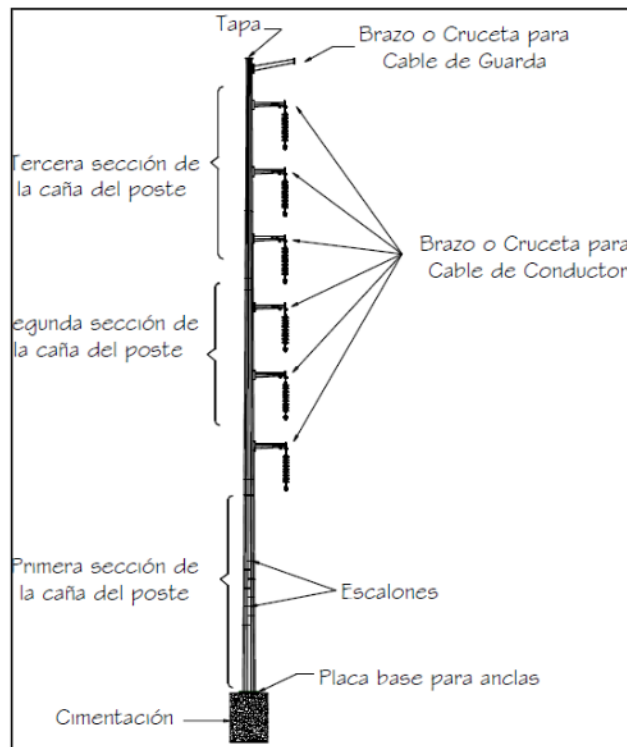


FIG. 7 POSTES TIPO LINDERO

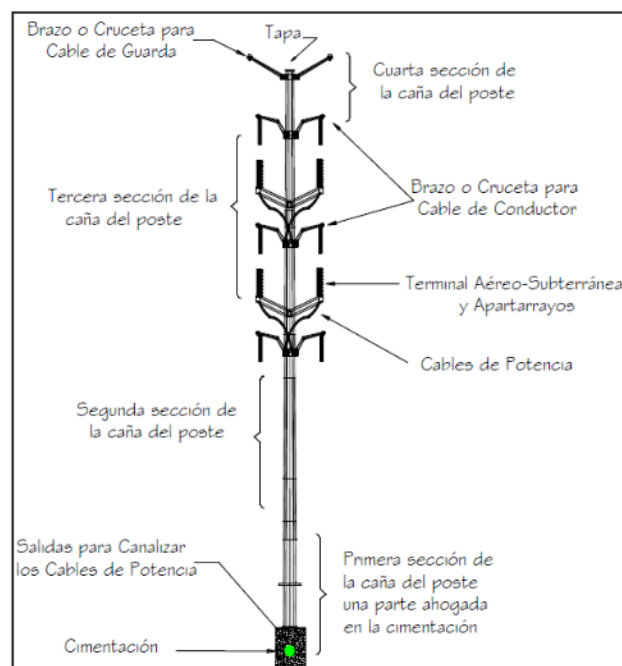


FIG. 8 POSTE TIPO TRANSICIÓN

POSTES MORELOS

Este tipo de estructuras nacen ante la necesidad de tener postes de transmisión de energía en redes subtransmisión para niveles de tensión eléctrica de hasta 115 kV, permitiendo contribuir con las restricciones del ancho de derecho de vía en zonas urbanas.

Algunas de las ventajas de este tipo de postes son:

- La instalación de los aisladores se realiza directamente sobre la estructura y generalmente se utilizan aisladores tipo poste para el uso en suspensión.
- Su diseño estructural garantiza el comportamiento de las cargas mecánicas que actúan sobre la estructura
- Son ligeros, económicos y su montaje es muy sencillo en comparación a las torres de celosía convencionales.

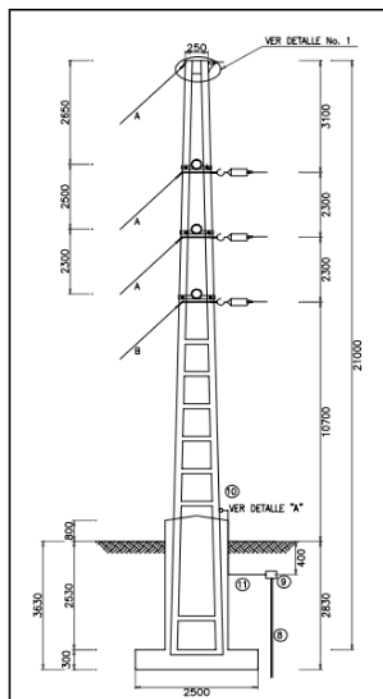


FIG. 9 POSTES MORELOS

ESTRUCTURAS FORMADAS POR POSTES DE MADERA

Los postes de madera pueden ser utilizados desde voltajes de media tensión hasta 115 kV y en algunos países hasta 230 kV; conformando estructuras denominadas “tipo H” y “tipo K” para su uso en suspensión y tensión, respectivamente. Para estos tipos de estructuras se emplean retenidas para soportar los esfuerzos mecánicos a los que se someten las estructuras.

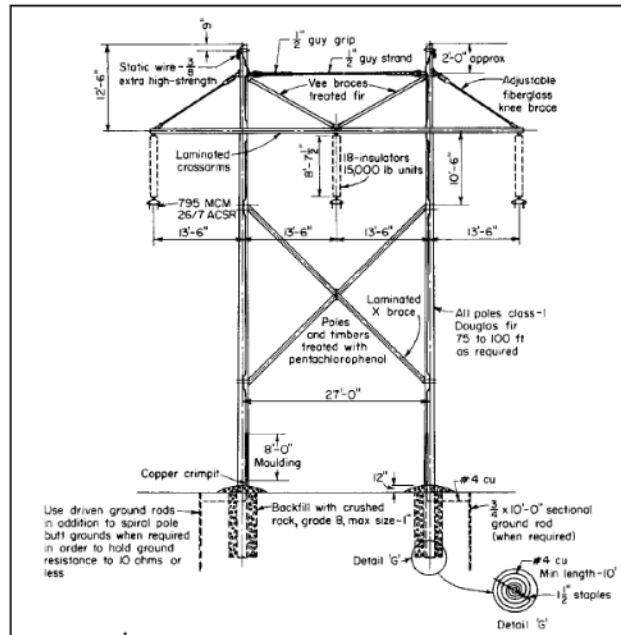


FIG. 10 ESTRUCTURA DE MADERA TIPO H

En la estructura tipo K, se puede observar que básicamente es una variación del tipo H. Lo que sí aprovecha esta estructura es el aislamiento que genera el espaciamiento de los brazos.

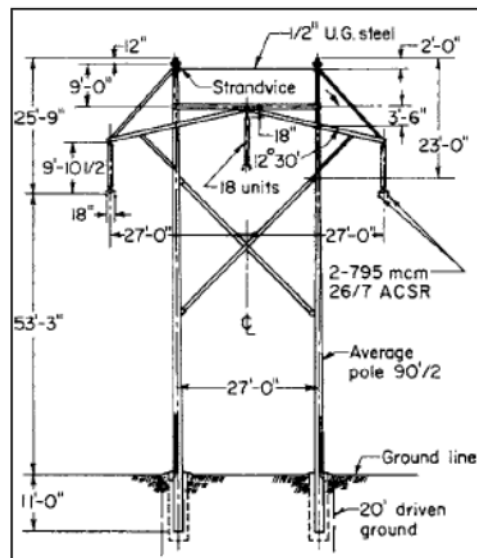


FIG. 11 ESTRUCTURA DE MADERA TIPO K

ESFUERZOS DE LAS ESTRUCTURAS

A continuación se detallaran los esfuerzos de una forma más ordenada:

EFFECTOS DEL VIENTO

Las líneas de transmisión son muy sensibles a los efectos de las ráfagas de viento, dependiendo de la localización y la forma de las estructuras cambia el grado de importancia de este efecto sobre las torres.

Los efectos que deben de considerarse en los estudios del impacto del viento sobre las estructuras son:

- Empujes dinámicos en la dirección del viento
- Vibraciones transversales al flujo del viento
- Vibraciones a alta frecuencia
- Inestabilidad dinámica

Para hacer estos estudios se necesita poseer grandes conocimientos de Análisis de Estructuras y resistencia de materiales, además de conocer las estadísticas del comportamiento del viento en los diferentes sectores. Normalmente, estos cálculos se realizan con programas computacionales.

CARGAS POR PESO PROPIO

Se trata del peso de la misma estructura el cuál trata de aliviarse debido al diseño de la misma. Como se mencionó antes, se procura tener un diseño que se auto-soportable, lo más liviano posible considerando la rigidez requerida.

CARGAS POR EFECTO DEL HIELO

Si se contara con información estadística para conocer la acumulación de hielo, este tipo de cargas podría transformarse, en forma probabilística en una carga que ocurre por cierto tiempo en las líneas. Sin embargo, en nuestro país, no se necesita aquella información debido a la posición global donde nos encontramos.

CARGAS POR CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO

Se deben de considerar durante el diseño de las estructuras de soporte de las líneas para que tenga una adecuada seguridad durante las operaciones de construcción o de mantenimiento. Se requiere un cuidado especial durante estas operaciones porque en estas ocasiones, es donde hay mayor probabilidad de causar una pérdida de vida. De esa manera, se debe diseñar para que todos los componentes soporten cargas críticas, de manera que prácticamente no haya probabilidad de que sufran daño alguno durante una operación de construcción o de mantenimiento.

Para el diseño de los componentes, la carga por el efecto del viento es prácticamente despreciable porque los pesos existentes durante las operaciones de maniobra son mucho más grandes.

CARGAS POR TENDIDO Y TENSADO

Al momento de tender las líneas de transmisión y tensarlo, además del peso de la línea que debe ser considerado precisamente durante todo el tiempo, también hay que considerar los esfuerzos longitudinales que genera el tensado de los cables sobre los componentes del sistema. Para reducir este efecto, el tensado se realiza muchas veces con la ayuda de poleas que no desgarran el cable y disminuyen la fricción existente.

ESFUERZOS SOBRE LA CIMENTACIÓN

Los esfuerzos en las torres pueden ser obtenidos por el método de los gráficos historiales, o por el uso de programas computacionales para análisis y diseños de torres. La mayoría de los diseñadores asumen el fundamento de que son rígidos. En la práctica actual, las torres son instaladas en tierra, por lo que un mal asentamiento podría producir esfuerzos excesivos los cuáles deben considerarse y tomados en consideración para proveer respaldo ante este factor.

Algunos modelos de torres de celosía, y la mayoría de estructuras tipo poste sufren de suficientes desplazamientos largos horizontales, así los esfuerzos no lineales debido a cargas verticales actuando en conjunto con aquellos desplazamientos (los llamados efecto P) deben de ser considerados en el diseño de la cimentación.

CÁLCULO DE LAS CARGAS

Las variables involucradas en el cálculo de las cargas mecánicas transferidas a los apoyos y las ecuaciones correspondientes se presentan a continuación:

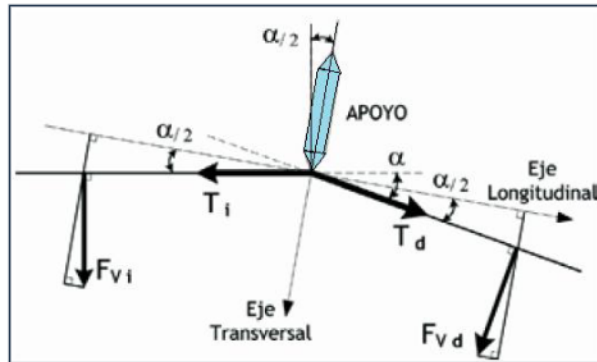


FIG. 12. DIAGRAMA DE CUERPO DE UN APOYO DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

n : Número de cables por fase

pa : Peso aparente de cada cable (kg/m)

Lp : Vano de apoyo en m

Q : Peso en kg de un conjunto cadena de aisladores, herrajes

nq : Número de cadenas de aisladores por fase.

CM : Carga de montaje (kg)

α : Ángulo de deflexión ($^\circ$)

pv : Peso del viento sobre el cable

ad,i : Longitud del vano derecho e izquierdo del apoyo.

$F_{vd,i}$: Fuerza del viento aplicada al lado izquierdo y derecho del apoyo.

$T_{d,i}$: Tensiones en kg al lado derecho e izquierdo del apoyo.

CARGAS VERTICALES:

Son debidas a la componente vertical de la tracción que ejercen los cables por su propio peso aparente, al peso de la cadena de aisladores y herrajes y a cargas eventuales debidas al montaje (el peso de una persona que realiza un montaje o mantenimiento). Estas cargas se calculan mediante la ecuación:

$$Cv = n \cdot pa \cdot Lp + nq \cdot Q + CM$$

CARGAS TRANSVERSALES:

Éstas actúan en el sentido del eje transversal del apoyo, y son debidas a la tensión que ejercen los cables a ambos lados del apoyo y a la presión del viento sobre dichos cables, que se supone actúa perpendicularmente al recorrido de la línea. Estas cargas se calculan mediante la ecuación:

$$Ct = n \left[(Td + Ti) \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \frac{(pv \cdot ad + pv \cdot ai)}{2} \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right]$$

CARGAS LONGITUDINALES

Éstas actúan en el sentido del eje longitudinal del apoyo, y son debidas a la tensión que ejercen los cables a ambos lados del apoyo y a la presión del viento sobre dichos cables. Estas cargas se calculan mediante la ecuación:

$$Cl = n \left[(Td + Ti) \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \frac{(pv \cdot ad + pv \cdot ai)}{2} \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right]$$

CÁLCULO DE LA FLECHA Y VANO

Una línea de transmisión debe de poseer su flecha a una distancia prudencial de las personas, árboles, objetos y otros conductores. Debido a esto, la flecha debe de ser determinada a partir del vano adecuado y viceversa. De manera que las distancias de seguridad de la línea no sean violadas. Así, se relacionan directamente el vano, con la flecha y por ende, es importante el cálculo adecuado para encontrar la colocación de cada una de las estructuras. Conociendo la fuerza horizontal H y el peso por unidad de longitud w se obtiene:

$$y = \frac{H}{w} \left[\cosh\left(\frac{wx}{H}\right) - 1 \right] \approx \frac{w \cdot x^2}{2H}$$

Note que se trata de una ecuación con forma de parábola y que su punto mínimo ocurre cuando $x=S/2$, donde S es el vano. De esa manera, la flecha máxima D tiene el siguiente valor:

$$D = \frac{H}{w} \left[\cosh\left(\frac{wS}{2H}\right) - 1 \right] \approx \frac{w \cdot S^2}{8H}$$

Así mismo, se puede calcular el largo del conductor a partir del mismo concepto de peso distribuido.

$$L = \frac{H}{w} \sinh\left(\frac{wx}{H}\right) \approx x \left(1 + \frac{x^2 w^2}{6H} \right)$$

Conociendo que para $x=S/2$, se tiene la mitad del largo del conductor, entonces:

$$L = \frac{2H}{w} \sinh\left(\frac{wS}{2H}\right) \approx \frac{S}{2} \left(1 + \frac{S^2 w^2}{24H} \right)$$

GUÍA PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Una línea de transmisión aérea es un sistema electromecánico, muy complejo. Lleva físicamente algunos componentes individuales, hechos de diferentes materiales, teniendo una variedad de propiedades mecánicas, como:

Flexibilidad Vs. Rigidez

Ductilidad Vs. Delicadez

Variabilidad de la dispersión de las fuerzas

Desgaste y deterioración de los distintos materiales a distintas tasas según el micro-ambiente.

Presentar el diseño de las estructuras se basa prácticamente en dos factores principales; los diferentes componentes deben de soportar la mitad del vano a ambos lados de la estructura de los cables de fase y los cables de guarda, y la distancia de seguridad debe ser respetada según la magnitud de voltaje y la diferentes configuraciones que tenga, guiados según la norma NESC, NATURAL ELECTRICAL SAFETY CODE.

Presentar un diseño de una línea de transmisión normalmente consiste de los siguientes pasos.

1. La empresa presenta una agenda que consiste en:

- Mandatorios o regulaciones de NESC y otros códigos
- Eventos climatológicos posibles en la ubicación de la línea
- Eventos de interés como contingencias, por ejemplo: la rotura de un conductor.

Cada uno de estos efectos es multiplicado por un factor llamado: Factor de capacidad de Sobrecarga, que sirve para cubrir la incertidumbre que podría causar sobre la agenda.

2. Se define un vano adecuado según el conductor

3. Un tipo de estructura se seleccionan en base a la experiencia pasada o de las recomendaciones de la estructura potencial de proveedores.

4. Todas las cargas del diseño resultante se aplican de forma estática como sus componentes en el sentido longitudinal, transversal y vertical, sobre estructura diseñada.

5. Utilizando las cargas y configuración de la estructura, las reacciones de la tierra sobre la cual está la línea se calculan y se utiliza para lograr el diseño de la cimentación.

6. Se reajusta la configuración de la línea se ajusta al perfil actual.

7. La Estructura de cimentación se modifican para tener en cuenta la variación en las longitudes del vano, los cambios de altura y ángulos de funcionamiento.

8. Como la mayoría de empresas de servicios públicos esperan que la estructura tangente a ser el eslabón más débil en el sistema de línea, el metal, aisladores y otros componentes se seleccionan para que sea la parte más fuerte de la estructura.

DISEÑO CONVENCIONAL

El siguiente diagrama de flujo resume los pasos para el diseño según se ha hecho convencionalmente. Sin embargo estos pasos están sujetos a pequeñas variaciones que se realizan con respecto a cómo avanza el trabajo.

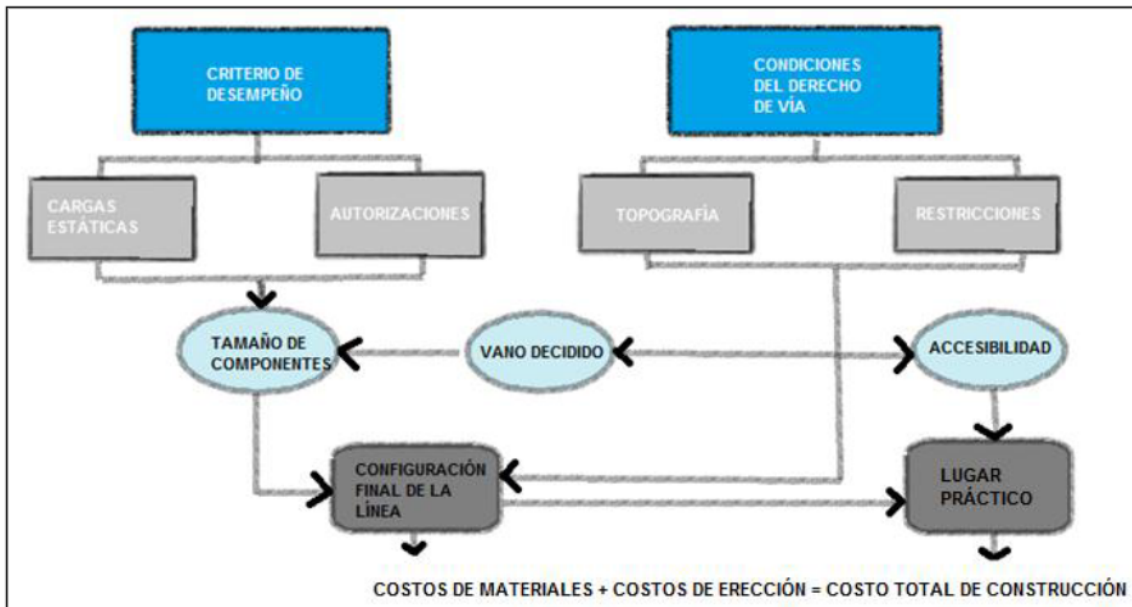


FIG. 13 DIAGRAMA DE FLUJO DEL DISEÑO DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Además de las observaciones interesantes sobre los niveles de **fiabilidad** relativos de los diferentes componentes del sistema de soporte estructural, la salida del estudio de simulación también proporciona la base para un proceso de toma de decisiones que se puede utilizar para determinar la rentabilidad de las iniciativas de gestión. Según las leyes simples de **estadísticas**, cuando hay dos resultados independientes a un evento, la probabilidad de que el primer resultado es igual a uno menos la probabilidad de que ocurra el segundo. Cuando estos resultados son la supervivencia y el fracaso:

$$\text{Probabilidad anual de supervivencia} = 1 - \text{Probabilidad anual de falla}$$

$$P_s = 1 - P_f$$

Si se desea conocer la probabilidad de supervivencia en un período de n años.

$$P_{st} = p_{s1} \cdot p_{s2} \cdot p_{s3} \cdots p_{sn}$$

Aplicando el mismo principio, la probabilidad de que los siguientes equipos sobrevivan 50 años, está dado a continuación:

- Las piernas de la torre 65%
- La cadena de tensión en el brazo que soporta el conductor tiene 63%
- La cadena de tensión en el brazo que soporta el cable de tierra tiene 23%
- La cimentación tiene el 13%

DETALLES PARA LA PREPARACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN

El costo de preparación para la construcción de líneas de transmisión es una considerable parte de su costo total, llegando a ser hasta el 25% de su costo.

La limpieza del terreno depende más bien de las condiciones topográficas del terreno, sin embargo, los costos dependen más de la obtención de materiales, acompañamiento de mapas, perfiles y trabajo de ingeniería. El trabajo de planificación es el más importante.

LOCALIZACIÓN

La ubicación de la línea debe ser determinada porque tiene un apoyo definido en el tipo de diseño. En casos extremos, como las secciones difíciles de montaña o en zonas muy desarrolladas cerca de las ciudades, esto puede ser un factor determinante en la selección del conductor y el tipo de estructuras.

En las líneas troncales, pequeñas reparaciones y reemplazos no son un elemento importante, por lo que la accesibilidad a menudo puede ser correctamente sacrificada para obtener la economía de una ruta más directa.

COLOCACIÓN DE TORRES

La ubicación eficiente de las estructuras en la ruta es un componente importante del diseño de la línea. La altura de las estructura y la fuerza adecuada deben estar ubicados para proporcionar suficiente espacio del conductor de tierra y de costo mínimo. En el pasado, la planificación para la colocación de torres se ha hecho de forma manual, el uso de plantillas, pero varios programas de ordenador han estado disponibles durante un número de años para la misma finalidad.

Una plantilla, con la forma del conductor suspendido, se utiliza para escalar la distancia desde el conductor al suelo y para ajustar la ubicación de la estructura y alturas para proporcionar espacio adecuado para el suelo; igualar vanos; y pendiente de la línea.

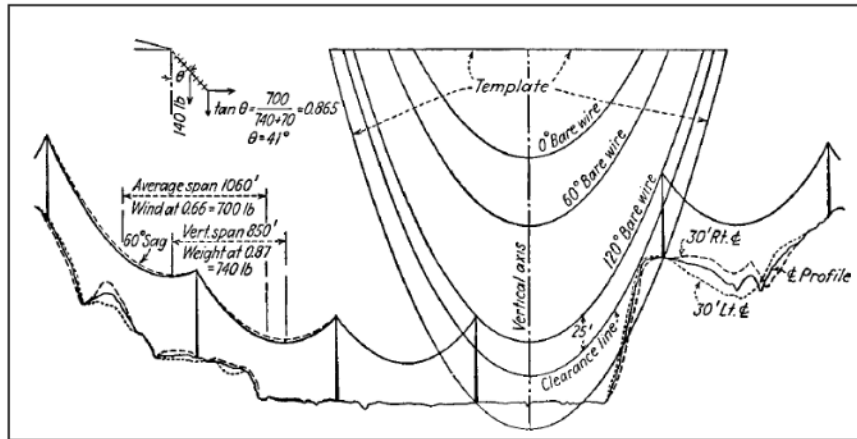


FIG. 15 Plantilla para colocación de los postes

COLOCACIÓN DE TORRES USANDO HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

En una línea de cualquier longitud considerable hay un número muy grande de posibles secuencias de localización de la torre, que cumplan con los requisitos mínimos de espacios libres eléctricos pero también cumplen con los límites máximos de carga de la estructura de la familia elegida. Con una considerable experiencia en el diseño, es posible seleccionar una solución razonablemente económica para la colocación de la torre, pero ningún método manual puede explorar todas las posibilidades, ni encontrar la solución de más bajo costo.

En los últimos años, los programas de ordenador se han hecho disponibles para explorar casi todas las torres posibles, detectar soluciones, seleccionando aquellos que tienen el menor costo. Además de explorar las soluciones de colocación de torres de nuevas líneas, estos programas informáticos permiten a los usuarios explorar alternativas de aumento de capacidad, incluyendo reconducción, la adición de estructuras, aumentar los puntos de fijación, y volver a tensar los conductores existentes. Con la llegada de cada vez más potentes ordenadores personales, y más fáciles de usar interfaces gráficas, estos programas se pueden aplicar incluso a líneas relativamente pequeñas.

Estos programas son especialmente atractivos cuando los modernos métodos digitales de obtención de datos sobre el terreno o existentes de línea de la estructura de ubicaciones, alturas y catenarias pueden ser utilizados para recoger la mayor cantidad de datos de entrada requeridos.

En la siguiente imagen se observa cómo la computadora realiza la función de costos según el distinto conductor para diferentes valores de tensión en el conductor y así encontrar el costo mínimo de construcción de las líneas de transmisión.

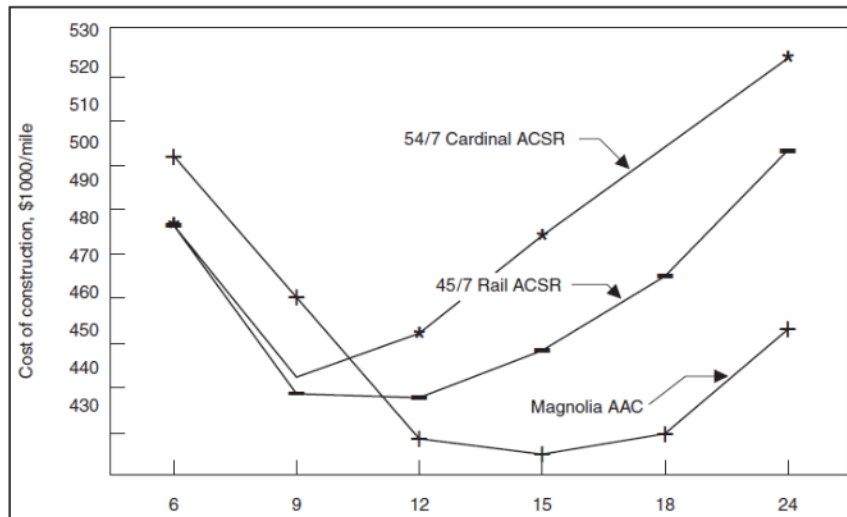


FIG. 15 COSTOS DE CONSTRUCCIÓN VERSUS TENSÓN EN LOS CONDUCTORES

CONCLUSIONES

Las estructuras que soportan las líneas de transmisión, son un elemento importante del sistema de potencia y el más visible de todos, por lo que cualquiera de estos que sea vistoso llamaría mucho la atención.

Para poder realizar un diseño adecuado de la estructura a usar es necesario realizar un estudio extenuante en el que se incluya una fase preliminar, una fase de cálculos y una fase final en la que se diseñe componente a componente.

Para realizar los estudios apropiados de las estructuras es necesario decidir según los criterios antes vistos el modelo de torre o poste a aplicar. Es imperativo seleccionar el nivel de confiabilidad y de seguridad que requieren éstas.

Además, en la elección de la estructura se deben de considerar aspectos como el cálculo de cargas debido al viento, debido al peso y a las cargas de construcción y mantenimiento.

El diseño más detallado de las líneas comprende evaluar el precio de esta alternativa con otras que podrían resultar más o menos económicas, no sólo al momento de construcción sino también a largo plazo.

REFERENCIAS

- [1] *Fink, Beaty*. "Standard Handbook of Electrical Engineering", McGraw-Hill, 15th edition, 2006.
- [2] Becerra, Lozano, García, DILATE, UNA HERRAMIENTA DE CÓMPUTO PARA EL DISEÑO DE LÍNEAS AÉREAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA
- [3] *Dekte, Reinert, Duarte, Pizzutti, Fank, Golemba, Möler*, ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR ELEMENTOS FINITOS APLICADO A SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA PROVINCIA DE MISIONES, ARGENTINA
- [4] *Connecticut Siting Council Application* Illustrations of Transmission Line Structure Types
- [5] *Joe Pohlman*, Transmission Line Structures
- [6] *Patricia Arnera, Amelio Giacopinelli, Alfredo Rifaldi*, APUNTES DE: "DISEÑO DE LINEAS ELECTRICAS" UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA
- [7] *Alma Hernández, Fabian Padilla*, Tesis para la obtención del título de Ing. Civil: Diseño de Torres de Transmisión Eléctrica
- [8] <http://skyscraperpage.com/diagrams/?searchID=55037298&page=1>

ANEXOS

ESTRUCTURAS PARA PROPÓSITOS ESPECIALES ALREDEDOR DEL MUNDO

East Pylon of Köhlbrand Powerline Crossing Östlicher Mast der Köhlbrand-Freileitungskreuzung

Hamburg Germany

Status: built Building Uses
- **electrical**
Structural Types
- **truss tower**
Materials
- steel

Heights	Value	Source / Comments
Roof	453 ft	wikipedia article

Description

• Part of a 110 kV powerline crossing with 4 circuits of Köhlbrand, a branch of Elbe river in Hamburg, in a 581 m long span.



West Pylon of Köhlbrand Powerline Crossing Westlicher Mast der Köhlbrand-Freileitungskreuzung

Hamburg Germany

Status: built Building Uses
- **electrical**
- communication
Structural Types
- **truss tower**
Materials
- steel

Heights	Value	Source / Comments
Roof	453 ft	wikipedia article

Description

• Part of a 110 kV powerline crossing with 4 circuits of Köhlbrand, a branch of Elbe river in Hamburg, in a 581 m long span.



Rightbank Tower of Bullenhausen Elbe Powerline Crossing Elbe-Freileitungskreuzung Bullenhausen

Hamburg Germany

Status: built Building Uses
- **electrical**
Structural Types
- **truss tower**
Materials
- steel

Heights	Value	Source / Comments
Roof	384 ft	http://de.wikipedia.org/wiki/Bullenhausen#Bullenhausen

Description

• At Bullenhausen Elbe Powerline Crossing crosses the double-circuit 380 kV powerline Hamburg-Moorburg — Hamburg-East, Elbe river in a 666 metres long span.



Leftbank Tower of Bullenhausen Elbe Powerline Crossing Elbe-Freileitungskreuzung Bullenhausen

Seevetal Germany

Status: built Building Uses
- **electrical**
Structural Types
- **truss tower**
Materials
- steel

Heights Value Source / Comments

Roof **384 ft** <http://de.wikipedia.org/wiki/Bullenhausen#Bullenhausen>

Description

• At Bullenhausen Elbe Powerline Crossing crosses the double-circuit 380 kV powerline Hamburg-Moorburg — Hamburg-East, Elbe river in a 666 metres long span.



Leftbank Pylon of Orsoy Rhine Powerline Crossing Maste der Rhein-Freileitungskreuzung Orsoy

Duisburg Germany

Status: built Building Uses
- **electrical**
Structural Types
- **truss tower**
Materials
- steel

Heights Value Source / Comments

Roof **345 ft** <http://bit.ly/KgUakr>

Description

• 380 kV powerline Walsum Power Station - Uftorf for crossing Rhine river with a 574 m long span



European Pylon of 2nd Bosphorus Powerline Crossing Boğaz Atlama II

Istanbul Turkey

Status: built Building Uses
- **electrical**
Construction Dates 1983 Structural Types
- **truss tower**
Materials
- steel

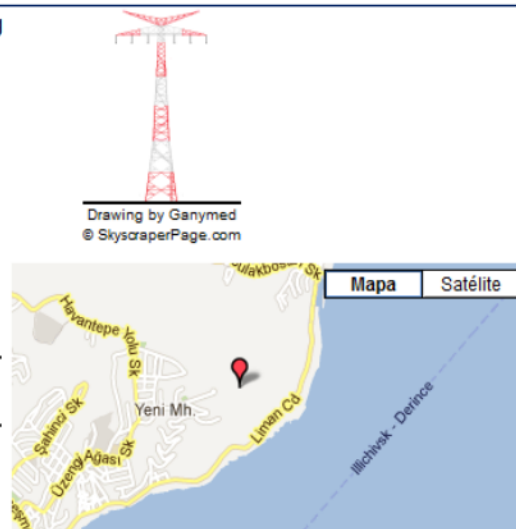
Heights Value Source / Comments

Roof **407 ft** p. 7 of pdf document

Crossbar **358 ft** -"

Description

• Bosphorus powerline crossing of a 380 kV powerline with two circuits. Span width over Bosphorus: 1757 m.



Damao Island Span North Tower

Damao Island

Dinghai ZJ China

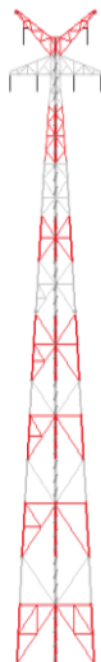
Status: built Building Uses
Construction Dates - **electrical**
Finished 2009 Structural Types
- **truss tower**
Materials
- steel

Heights Value Source / Comments

Roof 1214 <http://www.imaginechina.com/showStoryDetail.ic?ft id=pau301776###>

Description

• With <http://skyscraperpage.com/cities/?buildingID=6283> they are tallest electricity pylons in the world is used for a 2700 metres long span of a powerline to Zhoushan Island.



Drawing by Ganymed
© SkyscraperPage.com



Freiberger Riese

Freiberg Germany

Status: built Building Uses
- **electrical**
Structural Types
- **truss tower**
Materials
- steel

Heights Value Source / Comments

Spire 356 ft

Description

This electricity pylon, which is part of 380 kV powerline between Hoheneck and Pulverdingen substation, is used for the conduction of this line over the 380 kV-powerline between Hoheneck substation and Bürstadt substation, which runs over the 220 kV-powerline between Hoheneck and Pulverdingen substation.



Drawing by Ganymed
© SkyscraperPage.com



Yangtze River Crossing Nanjing - Pylon I

Nanjing JS China

Status:	built	Building Uses
Construction Dates		- electrical
Began	1992	Structural Types
Finished	1992	- tower
		Architectural Style
		- modern
		Materials
		- steel
		- concrete (plain)
		- concrete, reinforced

Heights	Value	Source / Comments
Spire	843 ft	http://www.pbpower.net/

Description

- Coordinates: 31°57'46"N, 118°36'58"E and 31°57'11"N, 118°38'4"E.
- Along with its twin, this is the tallest pylon of concrete core cone tube for lift shaft inside in the world and cross-members of steel atop it.
- Crossing Yangtze Rive at Nanjing city, a 500 kV overhead powerline (with two circuits) uses two 257 m (843 ft) tall pylons built of reinforced concrete. They carry 6 conductors in two levels. The span width is 2,053 m (6,736 ft).



Drawing by Ganymed
© SkyscraperPage.com

Pylons of Sorel-Tracy Saint Lawrence River Powerline Crossing

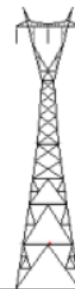
Sorel-Tracy QC Canada

Status:	built	Building Uses
		- electrical
		Structural Types
		- truss tower
		- cross brace
		- space frame
		- Vierendeel truss

Heights	Value	Source / Comments
Antenna	573 ft	http://en.wikipedia.org/wiki/Hydro-Qu%C3%A9bec%27s_electricity_transmission_system#Electricity_pylon

Description

- Tallest electricity pylon in Canada, part of a 735 kV powerline of Hydro Quebec. Pylon of similiar height on other shore.



Drawing by Ganymed
© SkyscraperPage.com

150 kV Poweline Triple Pylon at Left Bank тройная опора ЛЭП 150 кВ на левом берегу

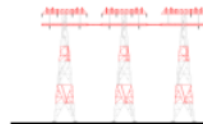
Zaporizhzhia Ukraine

Status: built Building Uses
- **electrical**
Structural Types
- **truss tower**
- cross brace
- space frame
- Vierendeel truss
Materials
- steel

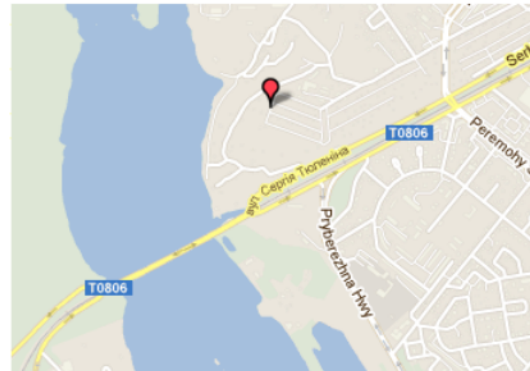
Heights	Value	Source / Comments
Roof	244 ft	http://io.ua/7775076p
Bottom of the gangway	208 ft	-

Description

- Pylon at another riverside: <http://skyscraperpage.com/cities/?buildingID=85555>
- Pylons were built between 1930 and 1932. Originally there were four pylons interconnected by a gangway under the crossbar. During World War II these pylons were destroyed or dismantled. Between 1945 and 1949 they were rebuilt according old plans on the old basements. However only 3 pylons were rebuilt.



Drawing by Ganymed
© SkyscraperPage.com



Leftbank Pylon of Wuhu Yangtze River Crossing

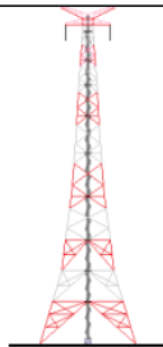
Wuhu AH China

Status: built Building Uses
- **electrical**
Construction Dates
Finished 2003 Structural Types
- **truss tower**
- tube
Materials
- steel

Heights	Value	Source / Comments
Spire	751 ft	Wikipedia

Description

- Two pylons are part of the HVDC Three Gorges-Changzhou, a 500 kV HVDC powerline running from the Three Gorges dam (static inverter plant: Longquan) to Changzhou (static inverter plant: Zhengping). On these pylons, which carry 2 conductors, HVDC Three Gorges-Changzhou crosses Yangtze River with a span width of 1910 metres. Both pylons are tubular steel structures and the tallest pylons of an HVDC powerline in the world.



Drawing by Ganymed
© SkyscraperPage.com



Orinoco Powerline Crossing

Torre de Conducción Eléctrica 230kV Isla Troncon

Caroní Venezuela

Status: built Building Uses
 Floor Count 1 - **electrical**
 - industrial
 Structural Types
 - **truss tower**
 - cross brace
 - other
 Materials
 - steel



Drawing by Ganymed
 © SkyscraperPage.com

Heights	Value	Source / Comments
Roof	787 ft	Cadafe

Description

- Contractor: CADAFE.
- Constructor: Hidro Proyect H P C A.

• Each pylon carries 6 conductors for 220 kV three-phase AC in 3 levels. On the top, there is a V-shaped crossbar for the ground conductors. The width of the both span fields are 2537 and 2161 metres. These pylons are the tallest man-made structures in South America (2008).