

REFLEXIONES ACERCA DEL DISEÑO DE POSTES DE ACERO PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN MÉXICO¹

Cuauhtémoc Cordero-Macías², Luis Ángel Mendoza-Mendoza³

RESUMEN: El uso de postes de acero como estructuras de soporte para líneas en México se ha incrementado en los últimos 30 años, debido principalmente al aumento de la mancha urbana y suburbana que demandan menos derecho de vía de este tipo de infraestructura y menos espacio para sus cimentaciones. Con la finalidad de cumplir estos fines, se han realizado numerosos estudios relacionados con el dimensionamiento dieléctrico, la optimización de la distancia entre fases para reducir pérdidas eléctricas, el peligro eólico asociado al sistema cables-aisladores-herrajes-estructura-cimentación, los criterios de diseño estructural basados en confiabilidad, pruebas mecánicas a escala natural, entre otros. En este artículo se presentan algunas reflexiones relacionadas con las diferentes etapas del diseño de postes metálicos para líneas de transmisión, desde los datos de entrada hasta los diseños estructurales, siguiendo los criterios de la industria eléctrica mexicana para un poste de 230 kV, 2 circuitos, ubicado en Mexicali, B.C.

Palabras clave: diseño estructural, líneas de transmisión, peligro eólico, postes de acero

REFLECTIONS ON THE DESIGN OF STEEL POLES FOR TRANSMISSION LINES IN MEXICO

ABSTRACT: The use of steel poles as support structures for lines in Mexico has increased in the last 30 years, mainly due to the increase in urban and suburban sprawl that demand less right of way for this type of infrastructure and less space for their foundations. To fulfill these requirements, numerous studies have been carried out related to dielectric sizing, optimization of the distance between phases to reduce electrical losses, wind hazard associated with the cable-insulator-hardware-structure-foundation system, structural design criteria based on reliability, natural-scale mechanical tests, among others. This article presents some reflections related to the different stages of the design of metal poles for transmission lines, from input data to structural designs, following the criteria of the Mexican electrical industry for a 230 kV pole, 2 circuits, located in Mexicali, B.C.

Keywords: structural design, transmission lines, wind hazard, steel poles

INTRODUCCIÓN

En México se considera a las líneas de transmisión a aquellos sistemas que conducen energía eléctrica para tensiones de 115 kV o mayores, interconectados y que constituyen el Sistema Eléctrico Nacional. Las estructuras que soportan estas líneas se clasifican en: torres, postes y marcos; la gran mayoría de las estructuras están fabricadas de acero galvanizado por inmersión en caliente.

Existen muchos documentos de suma importancia que nos conducen al diseño eléctrico y civil de postes de acero, pero quiero referirme a dos en particular: los relacionados a niveles isoceraunicos y los de velocidades de viento máximas.

La densidad de descargas atmosféricas se ha obtenido a partir de mapas. Los primeros mapas datan del año 1986 y fueron publicados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) (Comisión Federal de Electricidad, 1986). El siguiente estudio fue realizado entre la misma CFE y el Instituto de Investigaciones

¹Artículo recibido el 6 de octubre de 2022 y aceptado para publicación el 4 de abril de 2023.

² Profesor del Posgrado en Ingeniería Civil, Instituto Politécnico Nacional, Av. Miguel Bernard 322, La Escalera, 07320, Ciudad de México, México.
E-mail: ccorderom@ipn.mx

³ Maestro en Ingeniería Civil, Instituto Politécnico Nacional. E-mail: lmendoza1100@outlook.com

Eléctricas en el periodo de 1983 a 1993 (Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1994). Finalmente, con un mayor nivel de detalle, pero como un grupo de mapas mensuales (no anuales), la Universidad Nacional Autónoma de México a través del Centro de Ciencias de la Atmósfera, publica el Atlas Climático Digital de México con información del 2006 al 2010 (Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM, 2012) (Castillo, 2018). Dadas las condiciones ambientales actuales, es conveniente una actualización de estos mapas, tanto a nivel mensual como anual.

A partir de la primera edición del Manual de Diseño de Obras Civiles (MDOC) de la CFE en 1969, Capítulo de Diseño por Viento (Comisión Federal de Electricidad, 1969), por primera vez se definió de manera probabilista la distribución de las velocidades de viento regionales en la República Mexicana. En 1983 el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) se avocó en definir una metodología integral que recopilaba y analizaba las velocidades del viento máximas registradas desde 1940 en sesenta estaciones meteorológicas alrededor de la República Mexicana, así como las producidas por huracanes. A partir de esta base de datos depurada y consistente, se generaron los primeros mapas de isotacas de la República Mexicana con fines de diseño de líneas de transmisión (Sánchez & Aguirre, 1983). En 1993, el IIE editó la nueva versión del MDOC-DV (Comisión Federal de Electricidad, 1993), el cual incluía la actualización de los mapas de isotacas del país y en 1994 actualizaba los procedimientos de diseño mecánico de líneas de transmisión de la CFE adicionando otros mapas de isotacas para periodos de retorno adecuados al diseño de líneas y unificando también los criterios para el cálculo de presiones, flechas y tensiones de estos sistemas de gran importancia (López et al, 1994). Posteriormente, CFE por conducto del IIE realiza la actualización de los mapas de velocidades de viento para periodos de retorno fijo: 10, 50, 100 y 200 años, así como para diseño óptimo (Comisión Federal de Electricidad, 2008). En 2020 CFE publica la más reciente actualización del MDOC-DV, donde se presentan mapas de velocidades máximas de viento para periodos de retorno fijo: 10, 50 y 200 años, para velocidades regionales óptimas para factores de importancia de pérdidas $Q=5$ y $Q=15$, así como por tornados con periodos de retorno de 10,000,000 de años (Comisión Federal de Electricidad, 2020).

DISEÑO ELÉCTRICO

Las características electromecánicas de los postes generalmente son proporcionadas por medio de tablas. La Tabla 1 muestra las del caso en estudio.

Tabla 1: Características electromecánicas de poste de transmisión para 230 kV, 2 circuitos, 1 conductor/fase.

Característica	Valor
Tensión nominal (kV)	230.00
Número de circuitos	2
Disposición de conductores	Vertical
Tipo de conductor	1113 ACSR/AS
Número de conductores por fase	1
Tensión mecánica del conductor por fase (kN)	19.00
Tipo de cable de guarda	CGFO
Tensión mecánica del hilo de guarda (kN)	9.00
Utilización (Deflexión y Remate)	90° / 190 / 175

Deflexión, δ ($^{\circ}$)	90.00
Claro medio horizontal, CMH (m)	190.00
Claro vertical, CV (m)	175.00
Altitud sobre el nivel del mar (m)	50.00
Distancia dieléctrica de la fase lateral, d (m)	2.50
Distancia entre fases e hilo de guarda, G (m)	6.00
Distancia mínima vertical entre crucetas, Fv (m)	6.00
Distancia mínima horizontal entre fases, FH (m)	6.50
Arreglo de la cadena de tensión	Sencilla
No. de aisladores de tensión (Normales)	19.00
Tipo de aisladores	112 KN
Tipo de aisladores para puentes (Normales)	18.00
Ángulo de blindaje, α ($^{\circ}$)	0.00
Ángulo vertical de salida de conductores, β ($^{\circ}$)	10.00
Altura de conductor inferior a piso (m)	19.00

Las tensiones mecánicas del conductor e hilo de guarda deben estar en función del análisis de flechas y tensiones para las diferentes condiciones de tendido y operación, tanto iniciales como finales; por lo que el valor indicado en tablas similares a la Tabla 1 debe ser enunciativo más no limitativo.

En algunos casos, el ángulo de blindaje es negativo. Esta condición, desde el punto de vista estructural presenta el inconveniente de que transmite momentos flexionantes y torsionantes mayores en el fuste, comparados con los correspondientes a ángulos de blindaje de 0° . A partir de estas características eléctricas se procede a realizar la llamada “silueta del poste”, la cual corresponde al topológico que se utilizará en el análisis estructural.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al realizar el análisis de un poste de 230 kV, 2 circuitos, ubicados en la ciudad de Mexicali, B.C. Un circuito está formado por tres fases y generalmente cada fase esta soportada por un brazo de conductor, de tal forma que un poste de 2 circuitos tiene dos brazos de guarda y seis brazos de conductores.

A partir de los datos del sitio, se obtuvieron las velocidades máximas por viento para periodos de retorno fijo de 10 ($V_{R 10}$) y 50 ($V_{R 50}$) años, indicadas en la tabla C.1 del MDOC-DV (Comisión Federal de Electricidad, 2020).

$$V_{R 50} = 123.20 \text{ km/h}$$

$$V_{R 10} = 110.20 \text{ km/h}$$

En la Figura 1 se señala el sitio en estudio, mientras que la Tabla 2 indica las características físicas de los cables conductores y de guarda empleados en el análisis.



Figura 1: Ubicación satelital de la SE Ruiz Cortines, municipio de Mexicali, B.C.. (Google, 2023)

Tabla 2: Características físicas de los cables.

Característica	Conductor	Guarda	Unidad
Tipo de cable	1113 ACSR/AS	OPGW	---
Área de la sección transversal, S	603.00	123.00	mm ²
Diámetro externo, θ	31.98	14.50	mm
Peso por unidad de longitud, p	1.82	0.61	kg/m
Peso específico, W	0.003021559	0.0049675	kg/m/mm ²
Módulo de elasticidad inicial, Ei			kg/mm ²
Módulo de elasticidad final, Ef	6587.10	9700.00	kg/mm ²
Coefficiente de dilatación, α	2.08E-05	1.70E-05	1/°C
Tensión de ruptura, Tr	13286.00	7134.00	kg

Las diferentes partes que constituyen un poste se muestran en la Figura 2.

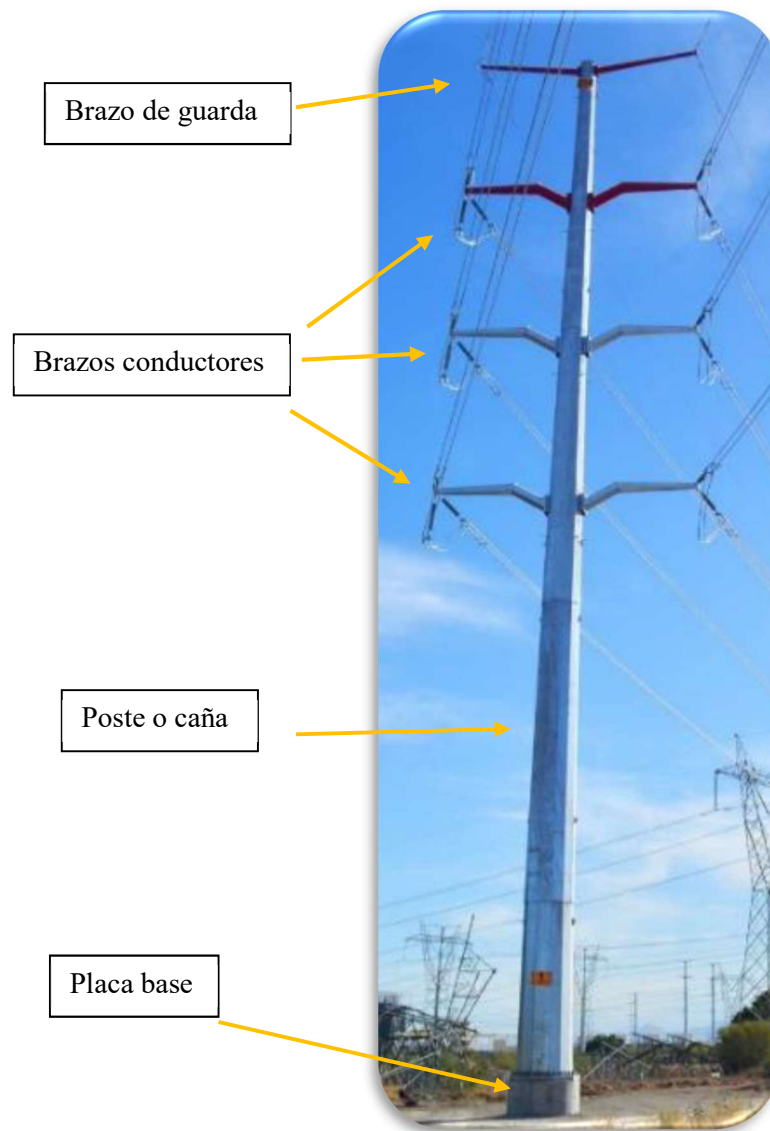


Figura 2: Partes principales que constituyen un poste.

El MDOC-DV considera al terreno como categoría 2. De acuerdo con la tabla 2.2 del mismo Manual, las variables para obtener el factor de exposición (F_{rz}) local son: (Comisión Federal de Electricidad, 2020)

$$c = 1.00$$

$$\alpha = 0.095$$

$$\delta = 350 \text{ m}$$

Con estos valores y a partir de la ecuación 2.4 de este último Manual (Figura 3), se obtuvieron los siguientes valores del factor de exposición, para las alturas efectivas de cables y estructura (Mendoza, 2022):

$$F_{rz} = c \quad \text{si} \quad z \leq 10 \quad (2.3)$$

$$F_{rz} = c \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \quad \text{si} \quad 10 < z < \delta \quad (2.4)$$

$$F_{rz} = c \left(\frac{\delta}{10}\right)^\alpha \quad \text{si} \quad z \geq \delta \quad (2.5)$$

donde

c	coeficiente de escala de rugosidad, adimensional,
z	altura por encima del terreno natural, a la cual se desea conocer la velocidad de diseño, en m,
α	exponente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura, adimensional, y
δ	altura medida a partir del nivel del terreno de desplante, por encima de la cual la variación de la velocidad del viento no es importante y puede suponerse constante; a esta altura se le conoce como altura gradiente, en m.

Figura 3: Factor de exposición. (Comisión Federal de Electricidad, 2020)

Para z_{ce} ; $F_{rz} = 1.09$

Para z_{ec} ; $F_{rz} = 1.11$

Conforme a la ecuación 2.1 de la Figura 4, a partir de los datos del sitio de estos datos y de la silueta del poste en estudio mostrada en la Figura 5, se obtuvieron las velocidades de diseño siguientes indicadas en Tabla 3:

$$V_D = F_T F_{rz} V_R \quad (2.1)$$

donde

F_T	factor que depende de la topografía local, adimensional,
F_{rz}	factor que toma en cuenta el efecto de las características de exposición local, adimensional,
V_R	velocidad regional de ráfaga que le corresponde al sitio en donde se construirá la estructura, en km/h.

Figura 4: Obtención de la velocidad de diseño. (Comisión Federal de Electricidad, 2020)

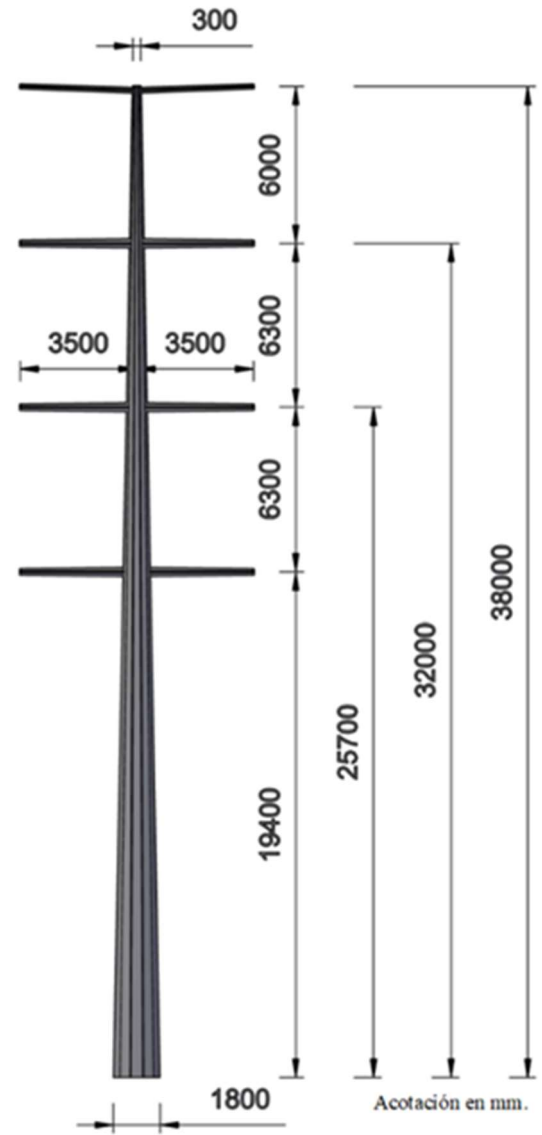


Figura 5: Silueta del poste en estudio.

Tabla 3: Velocidades de viento de diseño para diferentes periodos de retorno. (Mendoza, 2022)

COMPONENTE	Velocidades básicas de diseño para diferentes periodos de retorno (km/h)	
	50 años	10 años
Estructura	134.29	60.06
Cables	136.75	61.16

Las presiones dinámicas de base se obtuvieron de las ecuaciones 3.1 y 3.2 del MDOC-DV (Figura 6) para las condiciones de temperatura y altitud del sitio, $\tau = 1^\circ\text{C}$ y $\Omega = 756$ mm de Hg, las cuales se muestran en la Tabla 4.

$$q_z = 0.047 G V_D^2 \quad (3.1)$$

$$q_z = 0.0048 G V_D^2 \text{ (en kg/m}^2\text{)} \quad (3.1.a)$$

donde:

V_D velocidad básica de diseño, en km/h, definida en el inciso 2, y
 G factor de corrección por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar, adimensional.

El valor de G , adimensional, se obtiene con la siguiente ecuación:

$$G = \frac{0.392 \Omega}{273 + \tau} \quad (3.2)$$

donde:

Ω presión barométrica, en mm de Hg, y
 τ valor medio anual de las temperaturas mínimas diarias, en °C.

Figura 6: Expresiones para obtener la presión dinámica de base. (Comisión Federal de Electricidad, 2020)

Tabla 4: Valores de la presión dinámica de base. (Mendoza, 2022)

COMPONENTE	Presiones dinámicas de base (Pa)	
	50 años	10 años
Estructura	917.09	183.44
Cables	951.00	190.22

La presión del viento sobre estructuras de soporte o cables de la línea se obtiene considerando el efecto dinámico del viento y se puede obtener a partir de presiones equivalentes que emplean factores de respuesta dinámica que dependen de las condiciones de flujo y de las propiedades dinámicas del componente. La presión equivalente actuante en la estructura de soporte se calcula conforme a la especificación CFE J6100-54 (Comisión Federal de Electricidad, 2019) mediante la ecuación (1):

$$P_{ze} = F_{ge} C_a e q_z \quad (1)$$

Donde F_{ge} es el factor de respuesta dinámica de estructuras de soporte que se obtiene de la ecuación (2) de la especificación mencionada:

$$F_{ge} = \frac{1}{g_z^2} \left[1 + 12.86 \sqrt{K} \left(\frac{10}{h_o} \right)^{\alpha_r} \left(\frac{1}{1 + 0.563 \frac{h_o}{L_s}} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2)$$

Obteniéndose un valor de $F_{ge} = 3.33$

El coeficiente de arrastre se obtiene de la Tabla A5 del mismo documento normativo para una sección transversal dodecagonal con relación H/b = 31.5, a saber: $C_{ac} = 1.20$

De forma análoga se obtiene la presión equivalente sobre cables por medio de la ecuación (3):

$$P_z = 0.6 F_{gc} C_{ac} Q_z \quad (3)$$

En donde el factor de respuesta dinámica de cables se obtiene con la ecuación (4):

$$F_{gc} = \frac{1}{g_z^2} \left[1 + 12.86 \sqrt{K} \left(\frac{10}{z} \right)^{\alpha'} \left(\frac{1}{1 + 0.8 \frac{L}{L_s}} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (4)$$

L es el claro medio horizontal = 190 m, por lo que $F_{gc} = 2.69$ y $C_{ac} = 1.00$ según el inciso A.4.2 de la misma Especificación.

A manera de resumen, en la Tabla 5 se muestran los valores de las presiones de viento para estructura y cables.

Tabla 5: Presiones de viento. (Mendoza, 2022)

COMPONENTE	Presiones de viento (Pa)	
	50 años	10 años
Estructura	3665	733
Cables	1535	307

Las presiones de viento sobre la estructura se consideraron constantes con la altura, mientras que para cables se consideró la misma presión para todos (guarda y conductor).

Las tensiones mecánicas impuestas por los cables bajo diferentes condiciones meteorológicas se obtuvieron aplicando el método de la catenaria, ver ecuación (5), y la ecuación general de cambio de estado, ver ecuación (6). (Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1993)

$$\frac{H_2}{w_2} \sinh \left(\frac{w_2 d}{2H_2} \right) - \frac{H_1}{w_1} \sinh \left(\frac{w_1 d}{2H_1} \right) (I + \alpha \Delta\theta + \Delta\varepsilon) = 0 \quad (5)$$

$$\alpha \Delta\theta + \frac{\Delta H}{\varepsilon\phi} = \frac{d^2}{24} \left[\frac{w_2^2}{H_2^2} - \frac{w_1^2}{H_1^2} \right] \quad (6)$$

Donde:

H_1, H_2 Tensiones inicial y final

w_1 y w_2 Cargas inicial y final

d Claro

α Coeficiente de dilatación del cable

$\Delta\theta$ Variación de temperatura del cable

$\Delta\varepsilon$ Variación del módulo de elasticidad del cable

Con las combinaciones y factores de carga indicados en la especificación CFE J6100-54 (ver Tabla 6), se elaboró el árbol de cargas correspondiente.

Tabla 6: Combinaciones y factores de carga. (Comisión Federal de Electricidad, 2019)

Hipótesis de carga	Combinación de carga	Deformación permisible en fuste (%)	Viento
Servicio (deflexión)	(PC + PA + PE + CT) 1.0	3.00	---
Servicio (remate)	(PC + PA + PE + FL + CT) 1.0	3.00	---
Máxima sin hielo (deflexión)	(PC + PA + PE + VC + VE + CT) 1.26	---	VM
Máxima sin hielo (remate)	(PC + PA + PE + VC + VE + FL + CT) 1.26	---	VM
Máxima con hielo (deflexión)	(PCH + PA + PE + VCH + VEH + CT) 1.26	---	VR
Máxima con hielo (remate)	(PCH + PA + PE + VCH + VEH + FL) 1.26	---	VR
Tendido y mantenimiento	(PC + PA + PE + PVM + FL + CT) 1.0	---	---

En las condiciones básicas de carga empleadas para el análisis de los postes se identifican las cargas con las siguientes letras:

PC = Carga vertical en kN debida a la masa de los cables conductores y de guarda.

PCH = Carga vertical en kN debida al hielo acumulado en los cables.

PA = Carga vertical en kN debida a la masa de los aisladores, herrajes y accesorios.

PE = Masa propia del poste en kN.

PVM = Carga vertical de montaje y/o mantenimiento, la cual es de 2.9 kN para los brazos de cables de guarda y 4.9 kN para los brazos de cables conductores.

VC = Carga transversal en kN debida a la acción de VM sobre los cables de guarda y de conductor.

VCH = Carga transversal en kN debida a la acción de VR sobre los cables de guarda y de conductor ante la presencia de hielo acumulado.

VM = Velocidad regional máxima de viento coma para un periodo de retorno de 50 años.

VR = Velocidad reducida de viento. Se considera igual al 50% de la velocidad regional máxima de la zona de la línea, para un periodo de retorno de 10 años.

VE = Fuerza transversal coma en kN producida por la acción de viento VM sobre el poste.

VEH = Fuerza transversal coma en kN producida por la acción de viento VR sobre el poste.

FL = Fuerza longitudinal, en kN debida a la tensión en los cables. Para las condiciones de carga de servicio y de tendido se debe considerar la tensión diaria EDS (“Every Day Strenght”) en cables, para la condición de carga máxima se debe emplear la tensión obtenida con presiones de viento.

VM y para la condición máxima con hielo es la tensión aplicando VR y con presencia de hielo en caso de que éste exista.

CT = Componente transversal, en kN producida por la tensión de los cables de vida a la de flexión de la línea. Para las condiciones de carga de servicio y de tendido se debe considerar la tensión obtenida con presiones de viento VM y para la condición máxima con hielo es la tensión aplicando VR y considerando presencia de hielo en caso de que éste exista.

Algunas consideraciones adicionales que aplican a esta estructura son:

- a) Para el diseño, las hipótesis en un solo circuito instalado en disposición vertical y dos cables de guarda.
- b) PCH solo se presenta cuando se acumula una capa helada de 5mm de espesor en los cables.
- c) Para postes de remate, agregar una hipótesis adicional con el viento longitudinal.
- d) Para el cálculo de cargas transversales de tendido y mantenimiento, se usa la componente CT una vez.
- e) La aplicación de la carga por tendido y mantenimiento es una fase a la vez.

Con base en las combinaciones de carga anteriores y sus consideraciones adicionales, se definieron para los análisis 37 casos de carga. En la Figura 7 se muestran los puntos de aplicación de dichas cargas y la dirección preferencial de la presión de viento en estructura.

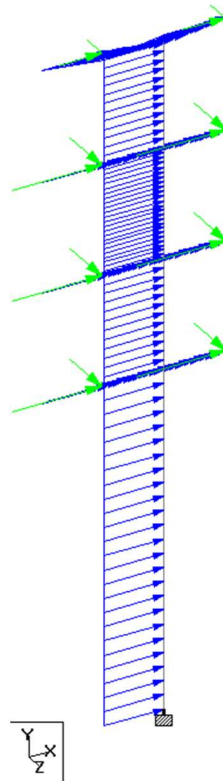


Figura 7: Vectores de carga y puntos de aplicación; presión transversal uniforme debida al viento en estructura.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Dada la gran deformidad de este tipo de estructuras, el análisis estructural que se emplea es no lineal, asistido por computadora, para este caso se utilizó STAAD.Pro Connect Edición V22. En cuanto a las secciones transversales, la práctica de fabricación mexicana ha sido que las secciones de postes sean telescopiadas dodecagonales y de los brazos son hexagonales, ambos en configuración vértice-vértice (P-P); esto permite secciones más eficientes desde el punto de vista esfuerzos y deformaciones. El fuste puede fabricarse en dos o hasta cuatro “medias cañas”, dependiendo de las dimensiones de su sección transversal y de las máquinas dobladoras de placa. La dimensión mínima en la corona debe ser de 30 cm, para que se pueda doblar la placa, mientras que la máxima en la base depende de la capacidad de doblez del equipo. De preferencia los tramos de postes deben tener una longitud máxima de 12 m, lo anterior obedece al largo de las tinajas de galvanizado para evitar doble inmersión, así como a la facilidad de transporte desde la fábrica hasta el sitio donde serán instalados o almacenados (Cordero, 2001).

Para modelar y analizar la estructura de soporte de la línea de transmisión aérea se consideraron elementos viga, el fuste del poste de acero es modelado con seis elementos para representar adecuadamente la rigidez que se desarrolla en el acoplamiento entre secciones y a su vez para conectar la caña con los nodos de cada uno de los brazos, modeladas por un solo elemento (Figura 8). Se asigna a los elementos viga conicidad, variando el diámetro inicial y final. (Ver Figura 9)

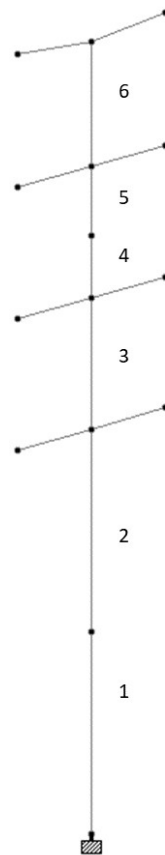


Figura 8: Modelo estructural del poste.

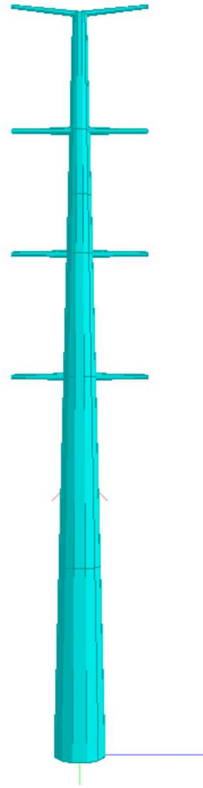


Figura 9: Conicidad de cada elemento.

Las propiedades asignadas a los postes corresponden con el tipo de acero utilizado en la fabricación de postes, según la especificación CFE J6100-54 (Comisión Federal de Electricidad, 2019) y son:

- a) ASTM A572 grado 60, con f_y mínimo de 413 MPa.
- b) ASTM A572 grado 65, con f_y mínimo de 448 MPa.
- c) ASTM A36, con f_y mínimo de 248 MPa.

Se realiza un análisis P-Delta, para tomar en cuenta los efectos de segundo orden producto de la deformación generada al aplicar la carga lateral de viento, la convergencia se define hasta que los esfuerzos inducidos ya no sean significativos.

DISEÑO ESTRUCTURAL

El diseño se realizó por esfuerzos admisibles con ayuda del Manual ASCE/SEI 48-19 (American Society of Civil Engineers, 2019), conforme lo indica la especificación CFE antes mencionada. En cuanto a las deformaciones admisibles, la caña del poste no debe exceder el 3% para las combinaciones de carga en servicio. Esta deformación horizontal corresponde al 3% de la altura total del poste medida desde la placa base hasta la corona del poste.

Se realizaron 90 análisis de postes, entre los más representativos resaltan 35 análisis para el acero ASTM A572-65, 15 análisis para ASTM A572-60 y 20 para ASTM A36. En la Tabla 7 se muestran los resultados de 39 postes analizados, con contorno verde están los postes que cumplen tanto por estado límite de falla como estado límite de servicio, mientras que **en negritas** se resaltan además los de **menor peso para las tres calidades de acero**.

Tabla 7: Resultados más significativos de los diseños obtenidos.

ID	Acero ASTM	Diámetro (mm)		Espesor ⁴ (mm)	Deformación máxima en el fuste ⁵ (m)	Porcentaje de trabajo máximo (%)	Peso total de acero (kN)
		Inferior	Superior				
1	A572-65	1800	300	12.7-12.7-12.7-12.7	1.27	213	134
2	A572-60	1800	300	12.7-12.7-12.7-12.7	1.27	231	135
3	A36	1800	300	12.7-12.7-12.7-12.7	1.27	384	137
4	A572-65	1800	800	12.7-12.7-12.7-12.7	0.82	205	164
5	A572-65	1900	300	12.7-12.7-12.7-12.7	1.10	192	140
6	A572-65	2000	900	12.7-12.7-12.7-12.7	0.59	166	182
7	A572-65	2000	800	12.7-12.7-12.7-12.7	0.63	1.66	176
8	A572-65	2000	700	12.7-12.7-12.7-12.7	0.67	1.66	170
9	A572-65	2000	600	12.7-12.7-12.7-12.7	0.72	1.66	164
10	A572-65	2000	500	12.7-12.7-12.7-12.7	0.78	166	158
11	A572-65	2000	400	12.7-12.7-12.7-12.7	0.86	168	152
12	A572-65	2000	300	12.7-12.7-12.7-12.7	0.96	174	146
13	A572-65	2000	700	12.7-12.7-12.7-9.5	0.67	166	164
14	A572-65	2000	700	12.7-12.7-12.7-6.35	0.69	165	158
15	A572-65	2000	700	12.7-12.7-9.5-9.5	0.71	165	156
16	A572-65	2000	700	12.7-12.7-9.5-6.35	0.72	165	149
17	A572-65	2600	900	12.7-12.7-12.7-12.7	0.30	97	218
18	A572-65	2600	900	12.7-12.7-12.7-9.5	0.31	97	210
19	A572-65	2600	900	12.7-12.7-12.7-6.35	0.31	97	202
20	A572-65	2600	900	12.7-12.7-9.5-9.5	0.32	97	199
21	A572-65	2600	900	12.7-12.7-9.5-6.35	0.19	97	191
22	A572-65	2600	300	12.7-12.7-12.7-12.7	0.47	104	182
23	A572-65	2600	500	12.7-12.7-12.7-12.7	0.39	99	194
24	A572-65	2600	500	12.7-12.7-12.7-9.5	0.40	99	189
25	A572-65	2600	800	12.7-12.7-9.5-6.35	0.35	97	187
26	A572-65	2600	700	12.7-12.7-9.5-6.35	0.38	97	183
27	A572-65	2600	600	12.7-12.7-12.7-6.35	0.38	97	188
28	A572-65	2700	300	12.7-12.7-12.7-12.7	0.43	97	188
29	A572-65	2700	300	12.7-12.7-12.7-9.5	0.44	97	184
30	A572-65	2700	400	12.7-12.7-12.7-12.7	0.39	95	194
31	A572-65	2700	400	12.7-12.7-12.7-9.5	0.40	95	189
32	A572-65	2700	500	12.7-12.7-12.7-9.5	0.36	92	195
33	A572-65	2700	600	12.7-12.7-9.5-6.35	0.37	97	184
34	A572-65	2800	500	12.7-12.7-9.5-6.35	0.37	99	185

⁴Los cuatro espesores de placa pertenecen a las cuatro secciones del fuste desde la base a la corona.

⁵ La deformación permisible en el fuste es de 1.14 m, correspondiente al 3% de la altura del poste (38.00 m).

ID	Acero ASTM	Diámetro (mm)		Espesor ⁴ (mm)	Deformación máxima en el fuste ⁵ (m)	Porcentaje de trabajo máximo (%)	Peso total de acero (kN)
		Inferior	Superior				
35	A572-60	2700	600	12.7-12.7-12.7-6.35	0.35	98	194
36	A572-60	2700	700	12.7-12.7-9.5-6.35	0.34	99	188
37	A572-60	2800	600	12.7-12.7-9.5-6.35	0.34	99	190
38	A36	3500	900	12.7-12.7-9.5-6.35	0.16	98	243
39	A36	3600	800	12.7-12.7-9.5-6.35	0.15	98	244

La conexión con la cimentación se realiza mediante una placa base, los diámetros mínimos de éstas, para los tres postes obtenidos del diseño estructural con el menor peso para cada tipo de acero, se muestran en la Figura 10 en color rojo, mientras que el diámetro mínimo de las pilas de cimentación se representa por el mayor círculo.

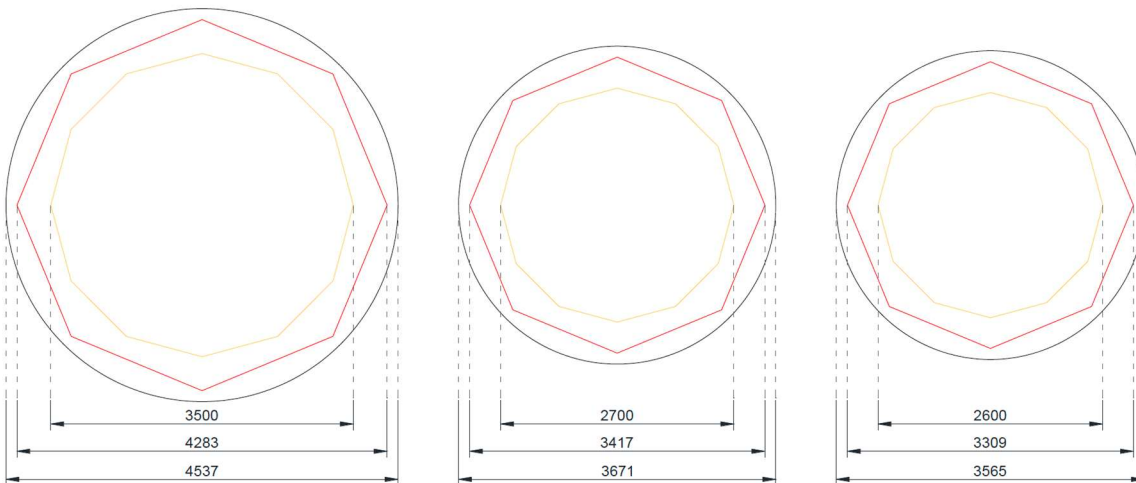


Figura 10: Dimensiones de las bases, placas base y pilas de cimentación para los tres diferentes tipos de acero: ASTM A-36 a la izquierda, A572 grado 60 al centro y A572 grado 65 a la derecha.

CONCLUSIONES

Se obtuvieron tres postes optimizados para los diferentes tipos de acero que cumplen con los estados límite de falla y de servicio:

- 1) Poste troncocónico con acero ASTM A572-65, diámetro en base de 2.60 m y en la corona con 0.70 m, formado por cuatro secciones con espesores de placa de 12.7, 12.7, 9.5 y 6.35 mm, respectivamente. El orden descrito es de la parte inferior a la superior en cada sección. Los brazos para conductor fueron de 330 mm en su conexión con la caña y 150 mm en la punta con un espesor de placa de 6.35 mm. Los brazos de guarda resultaron de 250 mm en su conexión con la caña y 150 mm en la punta con un espesor de placa de 6.35 mm. El peso total del poste, sin placa base fue de 182.6 kN.

- 2) Poste troncocónico con acero ASTM A572-60, diámetro en base de 2.70 m y en la corona con 0.70 m, formado por cuatro secciones con espesores de placa de 12.7, 12.7, 9.5 y 6.35 mm, respectivamente. Los brazos para conductor fueron de 340 mm en su conexión con la caña y 150 mm en la punta con un espesor de placa de 6.35 mm. Los brazos de guarda resultaron de 260 mm en su conexión con la caña y 150 mm en la punta con un espesor de placa de 6.35 mm. El peso total del poste, sin placa base fue de 188.3 kN.
- 3) Poste troncocónico con acero ASTM A36, diámetro en base de 3.50 m y en la corona con 0.90 m, formado por cuatro secciones con espesores de placa de 12.7, 12.7, 9.5 y 6.35 mm, respectivamente. Los brazos para conductor fueron de 430 mm en su conexión con la caña y 150 mm en la punta con un espesor de placa de 6.35 mm. Los brazos de guarda resultaron de 320 mm en su conexión con la caña y 150 mm en la punta con un espesor de placa de 6.35 mm. El peso total del poste, sin placa base fue de 242.9 kN.

El diseño de la estructura está gobernado más por los esfuerzos generados en cada sección de la caña, que por las deformaciones máximas permisibles; incluso utilizando aceros de mayor esfuerzo de fluencia, que permiten usar elementos más esbeltos pero que son más flexibles.

El rango de los espesores de placa que se utilizan está limitado a la capacidad de la máquina para conformar el doblez y mientras más difícil le sea ejecutarlo mayor sería el costo de fabricación. De lo contrario la sección más elevada del fuste de los postes podría incrementar su porcentaje de trabajo y disminuir el peso. El poste más ligero de los tres obtenidos es el correspondiente al mayor esfuerzo de fluencia, mientras que el más pesado corresponde con el acero ASTM A36. Dada la variación del precio de la placa de acero, no se hizo una comparativa del costo final de cada uno.

REFERENCIAS

- American Society of Civil Engineers. (2019). *Design of Steel Transmission Pole Structures*. Reston: ASCE.
- Castillo, E. (2018). Importancia estadística de la densidad de descargas atmosféricas a tierra; lógica difusa en la evaluación de riesgos de impacto de rayo en el Valle de Matatipac. *EDUCATECONCIENCIA*, 104-133.
- Comisión Federal de Electricidad. (1969). *Manual de diseño de Obras Civiles. Diseño por viento*. México, México: CFE.
- Comisión Federal de Electricidad. (1986). *Mapa de isodensidad de descargas atmosféricas en la República Mexicana*. México: CFE.
- Comisión Federal de Electricidad. (1993). *Manual de diseño de obras civiles. Diseño por viento*. México: Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- Comisión Federal de Electricidad. (2008). *Actualización de los mapas georreferenciados de velocidades de viento máximas para fines de diseño de estructuras para subestaciones y líneas de transmisión*. Cuernavaca, México: Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- Comisión Federal de Electricidad. (2019). *Especificación para diseño de postes metálicos para líneas Postes metálicos para líneas de transmisión y subtransmisión de 69 kV y mayores. Especificación J6100-54*. México, México: CFE.
- Comisión Federal de Electricidad. (2020). *Manual de diseño de obras civiles. Diseño por viento. Capítulo C.1.4*. México: Amazon. Versión Kindle.
- Cordero, C. (2001). Diseño de postes metálicos para líneas de transmisión. *BiTree* (p. 7). México: Biental de Transmisión.
- Google. (2023). *Google Earth*. Retrieved from <https://earth.google.com/>

- Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, UNAM. (2012). *Descargas eléctricas mensuales, nube a tierra*. México, México: Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático.
- Instituto de Investigaciones Eléctricas. (1993). *Definición de las condiciones básicas de carga y sus combinaciones para el diseño de estructuras de soporte de líneas de transmisión*. Cuernavaca: IIE.
- Instituto de Investigaciones Eléctricas. (1994). *Proyecto para la determinación de Isolíneas de densidad de descargas de rayos a tierra*. Cuernavaca, México: IIE.
- López et al, A. (1994). *Unificación de criterios en el cálculo de presiones, flechas y tensiones para el diseño mecánico de torres de transmisión*. Cuernavaca, México: Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- Mendoza, L. A. (2022). *Diseño óptimo de estructura y cimentación para un poste de transmisión de energía eléctrica. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil*. México: Instituto Politécnico Nacional.
- Sánchez, J., & Aguirre, J. E. (1983). *Mapas de velocidad máxima de viento en México*. Cuernavaca, México: Instituto de Investigaciones Eléctricas.