



UNIVERSIDAD  
DON VASCO, A.C.

# UNIVERSIDAD DON VASCO A.C.

Incorporación No. 8727 – 15

a la Universidad Nacional Autónoma de México

## Escuela de Ingeniería Civil

**ANÁLISIS DE LA MODERNIZACIÓN DE LA LÍNEA DE  
TRANSMISIÓN GUADALAJARA II – SIDERÚRGICA,  
MEDIANTE ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y DISEÑO DE  
CIMENTACIONES PARA POSTES TRONCOCÓNICOS  
DE LA AV. LÓPEZ DE LEGAZPI.**

Tesis  
que para obtener el título de

Ingeniero Civil

Presenta:

**Erik Humberto Tafolla Alcalá**

Asesor:

**Ing. Sandra Natalia Parra Macías**

Uruapan, Michoacán, 16 de Junio de 2014



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## AGRADECIMIENTOS

Con todo mi cariño para las personas que hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano para prosperar, a ustedes por siempre, mi corazón y mi agradecimiento.

Papá y mamá.

Gracias a esa persona tan importante, que gracias a su paciencia y comprensión me ha apoyado siempre, brindándome toda su ayuda sin esperar nada a cambio, con todo mi amor le dedico esta tesis.

Mi esposa Araceli

A mis hijas que me motivan a seguir superándome y tomar retos para desarrollarme personalmente, con todo mi cariño.

América y Grecia

A mis maestros y amigos, que gracias a su compromiso y entrega me ayudaron a lograr esta meta en mi vida y culminar así parte de mi formación académica.

# ÍNDICE

## Introducción

Antecedentes .....	1
Planteamiento del problema .....	3
Objetivo general.....	4
Pregunta de investigación.....	4
Justificación .....	5
Delimitación .....	5
Marco de referencia.....	6

## Capítulo 1.- Líneas de transmisión

1.1. Concepto de línea de transmisión .....	7
1.2. Clasificación de las estructuras según su importancia.....	10
1.3. Clasificación de las estructuras según su respuesta ante la acción del viento .....	11
1.4. Efectos del viento a considerarse .....	13
1.5. Cálculo de presiones de viento a partir de la velocidad regional ...	14
1.6. Clasificación de las cargas .....	32
1.7. Cargas para diseño.....	35
1.8. Identificación de las cargas.....	37
1.9. Combinaciones y factores de carga.....	38

## **Capítulo 2.- Análisis estructural de postes troncocónicos y diseño de sus cimentaciones asistido por computadora.**

2.1. Concepto de análisis y diseño estructural.....	42
2.2. Determinación de las flechas y tensiones mecánicas de cables ..	44
2.3. Hipótesis para el cálculo de flechas y tensiones.....	45
2.4. Ecuación de cambio de estado .....	47
2.5. Criterios de diseño .....	55
2.6. Análisis y diseño estructural de postes metálicos.....	59
2.7. Diseño de la cimentación a base de pila recta.....	72
2.7.1. Revisión ante capacidad de carga lateral.....	73
2.7.2. Revisión de los esfuerzos a compresión .....	76
2.7.3. Criterio para el cálculo de asentamientos.....	79
2.7.4. Diseño estructural de la pila .....	80

## **Capítulo 3.- Resumen ejecutivo de Macro y Micro localización**

3.1. Generalidades .....	84
3.2. Objetivo.....	85
3.3. Resumen ejecutivo .....	85
3.4. Macro y micro localización.....	86
3.5. Actividades de la región.....	89
3.6. Informe fotográfico .....	89

## **Capítulo 4.- Metodología**

4.1. Enfoque de la investigación .....	92
--	----

4.2. Alcance de la investigación.....	93
4.3. Diseño de la Investigación .....	93
4.4. Instrumentos de recopilación de datos .....	94
4.5. Descripción del procedimiento de investigación .....	95
 <b>Capítulo 5.- Cálculo, análisis e interpretación de resultados</b>	
5.1. Datos generales.....	97
5.2. Evaluación de las solicitudes actuantes .....	103
5.3. Árboles de carga para poste troncocónico 1216 DMP.....	105
5.4. Análisis estructural del poste troncocónico 1216 DMP asistido por computadora .....	117
5.5. Características del suelo .....	120
5.6 Diseño de la cimentación a base de pila recta .....	121
 <b>Conclusión.....</b>	 133
 <b>Bibliografía y otras fuentes de información.....</b>	 136

# INTRODUCCIÓN

## Antecedentes

La línea de transmisión eléctrica Guadalajara II – Siderúrgica, construida en una tensión nominal de 161 kV, con postes de madera y 25.3 kilómetros de longitud, instalados 2 circuitos con cable 477 ACSR/AS, y cables de guarda 7#8 AAS, localizada en el estado de Jalisco dentro de los Municipios de Guadalajara y Tlaquepaque, la cual forma parte del anillo de transmisión de la Zona Centro para abastecer a medianas y pequeñas empresas, fue construida en el año de 1988, se requiere de su modernización para garantizar el suministro eficiente de la energía eléctrica a la Metrópoli de Guadalajara, mediante la instalación de postes troncocónicos de acero galvanizado.

La Comisión Federal de Electricidad (CFE), a partir de 1977 inició el diseño eléctrico de siluetas para estructuras de transmisión eléctrica, fundamentando el dimensionamiento en los criterios básicos de aislamiento por impulso, en resultados experimentales de laboratorio en cuanto al comportamiento para distintas configuraciones de electrodos, así como el empleo de la teoría del modelo electrogeométrico para optimizar la posición del cable de guarda. Así, las primeras siluetas para la sujeción de los cables conductores de energía eléctrica se inicia con la creación de los postes troncocónicos para 230 kV, a partir del año 1980 se fueron desarrollando nuevas estructuras para la transmisión de la energía eléctrica.

Los postes troncocónicos para transmisión de energía eléctrica, al igual que las torres de acero, postes de madera y postes de concreto, constituyen uno de los elementos de soporte básicos de cables conductores, cables de guarda, aisladores, herrajes, etc., para la conducción de las líneas de transmisión. A través de los años y debido a la expansión del sistema eléctrico nacional, se han instalado diversos tipos de estructuras de acero, de acuerdo a las exigencias o particularidades geográficas en las diferentes tensiones eléctricas y número de circuitos por línea de transmisión, se decide la elección de las estructuras más convenientes.

Actualmente la red de transmisión de electricidad, se compone de: 46,052 kilómetros de líneas de 400, 230 y 161 kV; 327 subestaciones de potencia con una capacidad de 135,271 MVA, y 45,763 kilómetros de líneas de subtransmisión de 138 kV y otras tensiones menores, generando, transmitiendo, distribuyendo y comercializando energía eléctrica para 23.5 millones de clientes, lo que representa casi 80 millones de mexicanos.



## **Planteamiento del problema.**

Derivado de la necesidad de la CFE de contar con la infraestructura adecuada para transmitir la energía eléctrica con estructuras que garanticen la continuidad del servicio a sus clientes y una vez que las estructuras instaladas en la Av. López de Legazpi ya presentan un grado de deterioro avanzado por desgaste natural de los postes de madera instalados a más de dos décadas de uso, se ve en la necesidad de instalar postes de nueva generación a base de acero galvanizado, para garantizar la continuidad del servicio y no poner en riesgo a la población que transita por la avenida antes mencionada.

¿Es la mejor alternativa la sustitución de postes de madera por postes del tipo troncocónicos de acero galvanizado, como Modernización de la L.T. Guadalajara II – Siderúrgica en la Av. López de Legazpi?

La CFE ha tomado decisiones que requieren de solucionar problemas complejos para mitigar en lo posible un impacto ambiental, economizar el diseño de sus cimentaciones en base al análisis estructural particular de las estructuras, así como dar la confiabilidad que conllevan cada una de las etapas o fases que integran el ciclo de vida de las líneas de transmisión.

El concepto de confiabilidad de una estructura, se define como la probabilidad de que una línea de transmisión realice su función (transmitir la energía eléctrica) bajo un conjunto de condiciones y durante un tiempo especificado. El complemento de la confiabilidad es la probabilidad de falla; de ahí la importancia en el diseño de una

estructura de transmisión de energía eléctrica y su cimentación, ya que forman parte de las llamadas estructuras vitales, procurando la funcionalidad y economía de éstas.

### **Objetivo general:**

Determinar si la alternativa de sustitución de postes de madera por postes del tipo troncocónicos de acero galvanizado para la línea de transmisión Guadalajara II – Siderúrgica, es la óptima para garantizar la continuidad del servicio eléctrico en forma económica, siguiendo la normatividad de la CFE en sus especificaciones "CFE J6100-54", relativa a postes metálicos para líneas de transmisión de energía eléctrica y "CFE JA100-64" de, cimentaciones para estructuras de líneas de transmisión.

### **Objetivos particulares:**

- 1) Garantizar el suministro eléctrico al cliente final, colocando postes de mayor resistencia y durabilidad.
- 2) Optimizar el análisis de distribución de estructuras.
- 3) Economizar el diseño de cimentaciones realizando un análisis de cargas puntual.
- 4) Seguir al margen la normatividad establecida en las especificaciones emitidas por la CFE para diseños de líneas de transmisión eléctrica.

### **Pregunta de investigación**

¿Es la mejor alternativa la sustitución de postes de madera por postes del tipo troncocónicos de acero galvanizado, como Modernización de la L.T. Guadalajara II – Siderúrgica en el tramo de la Av. López de Legazpi?

## **Justificación**

La presente investigación propone establecer los lineamientos técnicos, teóricos y prácticos en el análisis estructural y diseño de cimentaciones de postes troncocónicos para la Línea de Transmisión Guadalajara II - Siderúrgica que garanticen confiabilidad, funcionabilidad y economía siguiendo el marco normativo establecido por la CFE.

Beneficiará a las pequeñas y grandes empresas de la Población de Guadalajara, Jalisco, garantizando el suministro de energía eléctrica, así como minimizar el impacto ambiental debido a la reducción de estructuras construidas dentro del derecho de vía de la Av. López de Legazpi.

## **Delimitación**

Esta investigación está limitada a desarrollar el análisis estructural y diseño de cimentaciones para Líneas de Transmisión Eléctrica conforme a los lineamientos de las especificaciones que emite la CFE dentro de su normativa del Sistema de Gestión de la Calidad para obras de Ingeniería Civil a desarrollarse dentro de la República Mexicana, en específico para la L.T. Guadalajara II - Siderúrgica, y en particular de la avenida López de Legazpi.

## **Marco de referencia**

La avenida López de Legazpi, está localizada en la zona centro de la metrópoli, entre las coordenadas 20°37'58" latitud norte y 103°21'39" latitud Oeste a una altitud de 1561 metros sobre el nivel del mar (msnm), es una de las avenidas principales de la ciudad, ya que permite el transporte vehicular de las zonas oriente y poniente, así como interceptando otras vialidades principales dando fluidez a la Metrópoli, siendo en este sitio en donde se desarrolla el presente estudio.

Actualmente en la Avenida López de Legazpi se tienen instalados 29 postes de madera pertenecientes a la L.T. Guadalajara II – Siderúrgica, los cuales serán sustituidos por 16 postes troncocónicos de acero galvanizado, mismos que garantizarán el suministro de energía eléctrica para la zona oriente de la ciudad y a su vez se mitigue el impacto ambiental debido a la disminución de postes a instalar.

La modernización de la Línea de Transmisión Guadalajara II – Siderúrgica comprende una de las etapas de la CFE por mantener su sistema eléctrico nacional en óptimas condiciones para dar la continuidad del servicio a toda la población que así lo requiera.

# **CAPÍTULO 1**

## **LÍNEAS DE TRANSMISIÓN**

En este capítulo se describirá el concepto de línea de transmisión, así como las variables que se tomarán en cuenta durante el proceso de análisis como: clasificación de estructuras, los efectos del viento y la clasificación de cargas, que servirán para llevar a cabo el desarrollo de la presente investigación.

### **1.1. Concepto de línea de transmisión.**

Las Líneas de Transmisión son las instalaciones que tienen como principal finalidad el transmitir la energía eléctrica desde las plantas generadoras hasta las subestaciones y de éstas últimas a los centros de consumo, están constituidas por conductores desnudos en una determinada disposición en el espacio, que a su vez forman circuitos que se encuentran aislados en aire mediante accesorios de vidrio, porcelana y/o sintéticos, suspendidos y/o rematados en estructuras de soporte, ya sea torres de acero autosoportadas, postes troncocónicos, postes de madera, etc., localizadas a lo largo de una trayectoria, las cuales se pueden desglosar en tres grandes rubros:

- Líneas Aéreas
- Líneas Subterráneas
- Líneas Submarinas

En el presente documento se considera únicamente el estudio de postes troncocónicos de acero, para su diseño se deben contemplar los parámetros de seguridad-economía, es decir, deben ser confiables pero no muy robustos. El concepto de confiabilidad estructural, se define como la probabilidad de que una línea de transmisión realice su función, bajo un conjunto de condiciones y durante un tiempo especificado. El complemento de la confiabilidad es la probabilidad de falla.

El diseño de estructuras que soportan cargas calculadas a esfuerzos específicos, se basa en la suposición de las propiedades mecánicas de los materiales estructurales para cumplir con los requerimientos definidos. En la determinación de las velocidades del viento, sólo se consideran aquellos efectos producidos por las tormentas que ocurren normalmente durante el año en todo el país y los causados por huracanes en las costas del Pacífico, del Golfo de México y del Caribe.

De acuerdo al Manual de Diseño de Obras Civiles (Diseño por viento) editado por CFE, clasifica los requisitos generales para el Análisis y Diseño de Estructuras sometidas a la acción del viento con las siguientes variables que deben tomarse en cuenta:

**“Dirección de Análisis.-** Las estructuras de soporte se analizarán suponiendo que el viento puede actuar por lo menos en dos direcciones horizontales perpendiculares e independientes entre sí. Se elegirán aquellas que representen las condiciones más desfavorables para la estabilidad de la estructura, o parte de la misma en estudio. En el caso de los cables, sólo será necesario el análisis cuando el viento incide

perpendicularmente a sus ejes longitudinales, así como los efectos oscilatorios que puedan presentarse. (Manual de diseño por viento CFE; 2008: 4.1 I.2)

**Factores de Carga y Resistencia.**- Se seguirán los lineamientos establecidos, en el Manual de Diseño de Obras Civiles (Diseño por viento) sección C Estructuras y la especificación CFE J6100-54 Postes Metálicos para Líneas de Transmisión y Subtransmisión.

**“Seguridad contra volteo.**- Debe verificarse la seguridad de las construcciones sin considerar las cargas vivas que contribuyan a disminuir el volteo. Para las estructuras pertenecientes a los grupos B y C, la relación entre el momento estabilizador y el actuante de volteo no deberá ser menor que 1.5 y para las del grupo A, no deberá ser menor que 2”. (Manual de diseño por viento CFE; 2008: 4.1 I.2).

**Análisis estructural.**- "Principalmente para las estructuras de soporte, se pueden aplicar los criterios generales del análisis elástico, con ayuda de un código de análisis computarizado que modele estructuras reticulares en forma tridimensional. El análisis elástico supone que el comportamiento de la estructura es lineal, y se funda en la hipótesis de que la deformación del material es lineal y considera que la deformación es proporcional a la carga aplicada cumpliéndose la ley de Hooke. Por otro lado, los modelos de análisis plásticos llevan al límite la deformación de los materiales llegando al límite de proporcionalidad". (Manual de diseño por viento CFE; 2008: 4.1 I.4)

Las consideraciones que maneja el manual de diseño por viento de la CFE, “Seguridad contra el deslizamiento” y “Seguridad contra el levantamiento”, no se

tomaran en cuenta para el caso del análisis de postes troncocónicos debido a su mínimo impacto, se consideran despreciables.

## 1.2. Clasificación de las estructuras según su importancia.

“Se recomienda que la seguridad necesaria para que la construcción cumpla las funciones para las que se define, se establezca a partir del niveles de importancia. En la práctica actual, dichos niveles se asignan a velocidades de diseño correspondientes a periodos de retorno constantes u óptimos.” (Manual de diseño por viento CFE; 2008: 4.1 I.4)

Según el nivel de importancia seleccionado para una estructura, las construcciones se clasifican en los grupos definidos a continuación:

“**Grupo A.**- Estructuras con un grado de seguridad elevado. Se incluyen en este grupo aquellas cuya falla cause la pérdida de un número importante de vidas, o perjuicios económicos o culturales excepcionales altos; las construcciones y depósitos cuya falla implique un peligro significativo por almacenar o contener sustancias tóxicas o inflamables; así como aquellas cuyo funcionamiento es imprescindible y debe continuar después de la ocurrencia de vientos fuertes tales como los provocados por huracanes. Ejemplos de este grupo son las construcciones cuya falla impida la operación de plantas termoeléctricas, hidroeléctricas y nucleares; entre estas pueden mencionarse las chimeneas, las subestaciones eléctricas, las torres y **Postes** que formen parte de líneas de transmisión importantes. Dentro de esta clasificación también se cuentan las centrales telefónicas e inmuebles de telecomunicaciones principales, estaciones de



bomberos, de rescate, de policía, hospitales e inmuebles médicos con áreas de urgencias, centros de operación en situaciones de desastre, escuelas, estadios, templos y museos”. (Manual de diseño por viento CFE; 2008: 4.1 I.4)

“**Grupo B.**- Estructuras para las que se recomienda un grado de seguridad moderado, se clasifican en este grupo aquellas que al fallar, generan baja pérdida de vidas humanas y que ocasionan daños materiales de magnitud intermedia.

**Grupo C.**- Estructuras con un grado de seguridad bajo. Son aquellas cuya falla no implica graves consecuencias, ni causa daños a construcciones de los grupos A y B. Abarca estructuras o elementos temporales con vida útil menor a tres meses, bodegas provisionales, cimbras, carteles, muros aislados con altura menor a 2.5m, etc.” (Manual de diseño por viento CFE; 2008: 4.1 I.5)

### **1.3. Clasificación de las estructuras según su respuesta ante la acción del viento.**

“Por las características del comportamiento de las estructuras a los efectos dinámicos del viento, las construcciones se clasifican en cuatro tipos. Una vez que se establezca su clasificación, podrá seleccionarse el método para estimar las cargas de diseño provocadas por el viento sobre la estructura.” (Manual de diseño por viento CFE; 2008: 4.1 I.6)

Las estructuras para líneas de transmisión respecto a su respuesta ante la acción del viento se pueden clasificar como tipo 2 ó 3. Derivado de la experiencia del desarrollo

de proyectos anteriores y a la recomendación de la especificación de la CFE J6100-54 Postes Metálicos para Líneas de Transmisión se considera clasificarlas como del tipo 2.

**“Tipo 1.-** Estructuras poco sensibles a las ráfagas y a los efectos del viento. Se agrupan en este tipo aquellas en las que la relación de esbeltez,  $\lambda$  (definida como la relación entre la altura y la menor dimensión en planta), es menor o igual que cinco y con un periodo natural de vibración del primer modo, menor o igual que un segundo.

**Tipo 2.-** Estructuras que por su alta relación de aspecto o las dimensiones reducidas de su sección transversal son especialmente sensibles a las ráfagas de viento de corta duración y cuyos periodos naturales largos de vibración favorecen la ocurrencia de oscilaciones importantes en la dirección del viento. Dentro de este tipo de estructuras se cuentan los edificios con relación de aspecto,  $\lambda$  mayor que cinco, o con periodo fundamental mayor que un segundo. Se consideran las torres atirantadas, torres auto soportadas para líneas de transmisión, chimeneas, tanques elevados, antenas, bardas, parapetos, anuncios y en general las construcciones que presentan una dimensión muy corta paralela a la dirección del viento.” (Manual de diseño por viento CFE; 2008: 4.1 I.6)

**“Tipo 3.-** Estas estructuras además de reunir todas las características de las del tipo 2, presentan oscilaciones importantes transversales al flujo del viento, provocadas por la aparición periódica de vórtices o remolinos con ejes paralelos a la dirección del viento. En este tipo se consideran las construcciones y elementos aproximadamente cilíndricos o prismáticos esbeltos, tales como las chimeneas, tuberías exteriores o elevadas, arbotantes, postes de distribución y cables de transmisión.

**Tipo 4.-** Estas estructuras que por su forma y dimensiones o por su magnitud de sus periodos de vibración (periodos naturales mayores a un segundo), presentan problemas aerodinámicos.” (Manual de diseño por viento CFE; 2008: 4.1 I.7)

#### **1.4. Efectos del viento a considerarse.**

Por su localización geográfica y su forma, las líneas de transmisión de energía eléctrica, son muy sensibles ante los efectos de ráfagas del viento, por tal razón, la respuesta dinámica generada por la interacción entre el sistema estructural (torres y/o postes y cables) y el viento, es lo que predomina en este caso.

Los efectos que se deben tener presentes en el análisis de las estructuras de soporte y cables sometidos a la acción del viento definidos por el Manual de diseño por viento de CFE, se clasifican como:

**1. “Empujes medios.** Son causados por presiones y succiones del flujo medio del viento, tanto exteriores como interiores y generan presiones globales (para el diseño de las estructura en conjunto) y locales, se considera que estos empujes no varían con el tiempo.

**2. Vibraciones generadas por ráfagas turbulentas en la dirección del viento.** Las generan fuerzas variables, paralelas al flujo medio, causadas por la turbulencia del viento y cuya fluctuación en el tiempo influye en la respuesta estructural.” (Manual de diseño por viento CFE; 2008: 4.1 I.7)

**3. “Vibraciones transversales al flujo y torsión.** La presencia de estructuras cilíndricas o prismáticas dentro del flujo de viento, genera el desprendimiento de vórtices

alternantes que provocan fuerzas y vibraciones transversales a la dirección del flujo. Entre estos cuerpos se encuentran los postes de transmisión y distribución cilíndricos, los cables conductores e hilo de guarda.

**4. Inestabilidad aerodinámica.** Es generada por la amplificación dinámica de la respuesta estructural causada por la geometría de la construcción, los distintos ángulos de incidencia del viento, las propiedades dinámicas de la estructura y el cambio de amortiguamiento aerodinámico. Tal es el caso del fenómeno de galopeo. El galopeo es una inestabilidad aerodinámica que se presenta en los cables. Generalmente el galopeo se asocia con condiciones climáticas particulares como son baja temperatura y alta humedad. En estas condiciones se forma una cubierta de hielo que se adhiere a los cables conductores, alterando su sección transversal y favoreciendo el galopeo. En nuestro país estas condiciones climáticas se presentan principalmente al norte y en las partes altas de las zonas montañosas.” (Manual de diseño por viento CFE; 2008: 4.1 I.8)

#### **1.5. Cálculo de presiones de viento a partir de la Velocidad Regional.**

De acuerdo con la Especificación de **CFEJ6100-54 “Postes metálicos para líneas de Transmisión y Subtransmisión”**, emite un apéndice para desarrollar el cálculo de presiones de viento en estructuras soporte para nuestro caso, los postes troncocónicos que forman parte de este proyecto.

A continuación se describe el desarrollo del cálculo de presiones de viento sobre estructuras conforme al Apéndice "A" de la Especificación **CFE J6100-54**.

## Determinación de la Velocidad de Diseño, $V_D$

La velocidad de diseño,  $V_D$  es la velocidad a partir de la cual se calculan los efectos del viento sobre las estructuras de soporte, cables y aisladores.

Para analizar las líneas de transmisión ante los efectos dinámicos mencionados, es necesario aplicar factores de respuesta dinámica debido a ráfagas de viento que se presentan en estructura y cables.

Clasificación de la línea de transmisión según su importancia.

El diseño de las líneas de transmisión debe realizarse seleccionando un nivel de importancia de la línea, el cual, a su vez, está relacionado con el periodo de retorno de la velocidad regional, como se muestra en la tabla siguiente:

PERÍODO DE RETORNO	25	50	100	200	400
% Probabilidad anual	4	2	1	0.5	0.25
Nivel de confiabilidad	0.5	1	2	4	8
% Riesgo de ocurrencia en 50 años	87	64	39	22	12
Factor de carga o confiabilidad	0.85	1.00	1.15	1.30	1.45

Tabla 1.1.- Variación de confiabilidad en función del periodo de retorno.

Fuente: Manual de diseño civil de líneas de transmisión aéreas CFE

La selección del nivel de importancia adecuado para una línea en particular debe hacerse en función de los siguientes aspectos:

**a) Consecuencia de una falla.** La falla de una línea de transmisión puede causar medianas o graves consecuencias, por lo que el proyectista debe asignarle un nivel de importancia adecuado.

**b) Importancia de la Línea.** El grado de interconexión que tenga la línea de manera que se pueda mantener continuamente el suministro de la energía eléctrica, esto en general se puede relacionar con el voltaje de la línea.

**c) La localización y la longitud de la línea.** Puede ser necesario seleccionar un nivel más alto para una línea que cruce un área urbana a la que esté localizada en campo abierto. Asimismo, si todos los parámetros son los mismos, una línea más larga puede presentar mayores fallas que una corta, pues una larga está expuesta a un mayor número de eventos severos, y por lo tanto, es más susceptible de sufrir una falla; asimismo, al existir mayor número de componentes estructurales es más vulnerable a las fallas.

En CFE se utiliza un periodo de retorno de 50 años para el diseño de estructuras de soporte para líneas de transmisión.

### **Velocidad de diseño**

La velocidad básica de diseño la consideramos en km/h, y se obtiene de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$V_D = F_T F_\alpha V_R$$

donde:

**F<sub>T</sub>** Factor que depende de la topografía local, adimensional.

**$F_{\alpha}$**  Factor que toma en cuenta el efecto combinado de las características de exposición local, y de la variación de la velocidad con la altura, adimensional.

**$V_R$**  Velocidad regional de ráfaga que le corresponde al sitio en donde se construirá la estructura, en km/h.

### **Velocidad Regional $V_R$ .**

“La velocidad regional del viento  $V_R$ , es la máxima velocidad media probable de presentarse con un cierto periodo de recurrencia en una zona o región determinada del país.” (Especificación CFE J6100-54; 2011: 28)

La velocidad regional de viento se obtiene de los mapas de isotacas que se incluyen en las figuras anexas que forman parte del Manual de diseño por viento de la CFE, se presentan las velocidades máximas para diferentes periodos de retorno; la velocidad se refiere a condiciones homogéneas que corresponden a una altura de 10 metros sobre la superficie del suelo en terreno plano, es decir, no considera las características de rugosidad locales del terreno ni la topografía específica del sitio. Así mismo dicha velocidad se asocia con ráfagas de 3 segundos y toma en cuenta la posibilidad de que se presenten vientos debidos a huracanes en las zonas costeras.

La velocidad regional,  $V_R$  se determina tomando en consideración tanto la localización geográfica del tramo de la línea como su importancia. En las figuras anexas se muestran los mapas de isotacas regionales correspondientes a periodos de retorno de 50 y 10 años, respectivamente, así como el mapa de temperaturas de invierno mínimas promedio de la República Mexicana.

El tramo de la línea se localizará en el mapa con el periodo de retorno que corresponde al nivel al que pertenece la línea a fin de obtener la velocidad regional. Si existen tramos que crucen diferentes isotacas, se deberá seleccionar la más desfavorable. En la tabla 1.2. se presentan algunas de las principales ciudades del país y sus correspondientes velocidades regionales para diferentes periodos de retorno.

Ciudad	Núm. Obs.	(km/h)		
		V <sub>10</sub>	V <sub>50</sub>	V <sub>200</sub>
Acapulco, Gro.	12002	120	150	173
Aguascalientes, Ags.	1001	110	120	140
Campeche, Camp.	4003	108	135	160
Cd. Guzmán, Jal.	14030	120	140	150
Cd. Juárez, Chih.		129	144	160
Cd. Obregón, Son.	26020	140	156	173
Cd. Victoria, Tamps.	28165	135	159	170
Coatzacoalcos, Ver.	30027	132	148	163
Colima, Col.	6006	130	150	170
Cozumel, Q. Roo.	23005	140	200	250
Cuernavaca, Mor.	17726	102	120	130
Culiacán, Sin.	25014	90	107	120
Chetumal, Q. Roo.	23006	113	153	189
Chihuahua, Chih.	8040	130	150	162
Chilpancingo, Gro.	12033	120	138	150
Durango, Dgo.	10017	110	124	140
Ensenada, B. C.	2025	86	105	120
Guadalajara, Jal.	14065	100	110	120
Guanajuato, Gto.	11024	140	160	170
Guaymas, Son.	26039	139	159	170
Hermosillo, Son.	26040	108	120	140
Jalapa, Ver.	30075	120	139	150
La Paz, B.C.	3026	124	164	197
León de los Aldama, Gto.	11025	140	159	170
Manzanillo, Col.	6018	127	164	195
Mazatlán, Sin.	25062	130	179	220



Ciudad	Núm. Obs.	(km/h)		
		V <sub>10</sub>	V <sub>50</sub>	V <sub>200</sub>
Mérida, Yuc.	31019	126	172	213
México, Central.	9048	100	110	120
Monterrey, N.L.	19052	123	143	160
Morelia, Mich.	16080	110	120	130
Oaxaca, Oax.	20078	100	110	120
Orizaba, Ver.	30120	130	147	163
Pachuca, Hgo.	13022	100	117	128
Puebla, Pue.	21120	100	112	122
Puerto Vallarta, Jal.		114	137	155
Tampico, Tamps.	28110	125	153	186
Tepic, Nay.	18039	110	130	149
Tlaxcala, Tlax.	29031	100	110	120
Toluca, Edo. de Mex.	15126	100	110	120
Torreón, Coah.	5040	130	150	160
Tuxtla Gutiérrez, Chis.	7165	104	120	131
Veracruz, Ver.	30192	140	170	180
Villahermosa, Tab.	27083	112	128	140
Zacatecas, Zac.	32031	117	133	146

Tabla 1.2.- Velocidades regionales de las ciudades más importantes.

Fuente: Manual de diseño por viento CFE

### Factor de Topografía $F_T$

“Este factor toma en cuenta el efecto topográfico local del sitio de desplante de la estructura de soporte, así como el efecto en los cables sobre las velocidades máximas.”(Especificación CFE J6100-54; 2011: 29)

Si la estructura se ubica en las laderas o cimas de colinas o montañas de altura importante con respecto al nivel general del terreno circundante, se generarán aceleraciones de flujo del viento y, por consiguiente, deberá incrementarse la velocidad

regional para obtener las presiones reales del viento. En la tabla 1.3. se muestran los valores que se recomiendan con base a la experiencia tomar para el factor de topografía, de acuerdo con las características topográficas del sitio.

<b>SITIOS</b>	<b>TOPOGRAFÍA</b>	<b>F<sub>T</sub></b>
Protegidos	Base de promontorios y faldas de serranías del lado del sotavento	0.80
	Valles cerrados	0.90
Normales	Valles cerrados prácticamente plano, campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menores de 5%	1.00
Expuestos	Terrenos inclinados con pendientes entre 5 y 10 %, valles abiertos y litorales planos	1.10
	Cimas de promontorios, colinas y montañas, terrenos con pendientes mayores que 10 %, cañadas cerradas y valles que formen un embudo o cañón, islas	1.20

Tabla 1.3.- Niveles de importancia y sus periodos de retorno relacionados

Fuente: Especificación CFE J6100-54

### **Factor de Exposición F<sub>α</sub>**

El coeficiente F<sub>α</sub>, “refleja la variación de la velocidad del viento con respecto a la altura (z). Asimismo, considera las características de rugosidad que se presentan alrededor del tramo de la línea” (Especificación CFE J6100-54; 2011: 29) en estudio, en la tabla 1.4., se muestran cuatro categorías de terrenos atendiendo el grado de la rugosidad. Si el tramo de línea cruza diferentes tipos de terreno deberá seleccionarse la que ocasione los efectos más desfavorables.

CAT.	DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS	LIMITACIONES
1	Terreno abierto, prácticamente plano y sin obstrucciones	Franjas costeras planas, zonas pantanosas, campos aéreos, pastizales y tierras de cultivo sin setos o bardas alrededor, superficies nevadas planas.	La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser 2000m ó 10 veces la altura de la construcción por diseñar.
2	Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones	Campos de cultivo o granjas con pocas obstrucciones tales como setos o bardas alrededor, árboles y construcciones dispersas.	Las obstrucciones tienen alturas de 1.5 a 10m en una longitud mínima de 1500m ó 10 veces la altura de la construcción.
3	Terreno cubierto por numerosas obstrucciones estrechadamente espaciadas	Áreas urbanas, suburbanas, o cualquier terreno con numerosas obstrucciones estrechadamente espaciadas. El tamaño de las construcciones corresponde al de las casas y viviendas.	Las obstrucciones presentan alturas de 3 a 5m. la longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser de 500m o 10 veces la altura de la construcción.
4	Terreno con numerosas obstrucciones largas, altas y espaciadas	Bosques, centros de grandes ciudades y complejos industriales bien desarrollados.	Por lo menos el 50% de los edificios tienen una altura mayor que 20m. las obstrucciones miden de 10 a 30m de altura. La longitud mínima del terreno en la dirección del viento mayor de 400m.

Tabla1.4.-Categoría del terreno según su rugosidad

Fuente: Especificación CFE J6100-54.

La dirección del viento en que se esté analizando el terreno, será la rugosidad (categoría) correspondiente cuando menos en una distancia denominada longitud mínima de desarrollo, la cual se consigna en la tabla 1.5., para cada categoría del terreno. Cuando no exista esta longitud mínima, el factor de exposición,  $F_a$  deberá modificarse para tomar en cuenta este. En este caso, el diseñador podrá seleccionar, entre las categorías de los terrenos que se encuentren en una dirección de análisis

dada, que provoque los efectos más adversos y determinar el factor de exposición para tal categoría.

El factor de exposición  $F_\alpha$ , se obtiene de acuerdo con las expresiones siguientes:

$$F_\alpha = 1.56 \left[ \frac{10}{\delta} \right] \quad \dots\dots\dots \text{Si } z \leq 10 \text{ m}$$

$$F_\alpha = 1.56 \left[ \frac{z}{\delta} \right]^\alpha \quad \dots\dots\dots \text{Si } 10 < z < \delta$$

$$F_\alpha = 1.56 \quad \dots\dots\dots \text{Si } z \geq \delta$$

Donde:

- z** Es la altura por encima del terreno natural, a la cual se desea conocer la exposición de la velocidad de viento de diseño, en m. (Normalmente para cables y estructura se define a 2/3 de la altura total de la estructura).
- δ** Es la 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; m.
- α** Es el coeficiente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura, adimensional.

Los coeficientes  $\alpha$  y  $\delta$  están en función de la rugosidad del terreno, los valores recomendados se presentan en la tabla 1.5.

Coeficientes	Categoría del Terreno			
	1	2	3	4
$\alpha$	0.099	0.128	0.156	0.170
$\delta$	245	315	390	455

Tabla 1.5.- Coeficientes en función de la rugosidad del terreno.

Fuente: Especificación CFE J6100-54.

### Cálculo de la presión dinámica de base, $q_z$ .

“Cuando el viento actúa sobre un obstáculo, genera presiones sobre su superficie que varían según su intensidad de la velocidad y la dirección del viento. La presión que ejerce el flujo del viento sobre una superficie plana perpendicular a él, se denomina comúnmente presión dinámica de base  $q_z$ , en  $\text{kg/m}^2$ , y se determina con la siguiente expresión:” (Especificación CFE J6100-54; 2011: 31)

$$q_z = 0.0048 * G * V_D^2$$

en donde:

- G** Factor de corrección por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar, adimensional.
- $V_D$**  Es la velocidad básica de diseño, en km/h.
- $q_z$**  Es la presión dinámica de base a una altura  $z$  sobre el nivel del terreno en  $\text{kg/m}^2$ .

El factor de 0.0048 corresponde a un medio de la densidad del aire ( $\rho=1.2255 \text{ kg/m}^3$  para  $15^\circ \text{ C}$  y al nivel del mar).

**Factor de corrección por temperatura y altura, respecto al nivel del mar (G).**

“El factor de corrección por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar se obtiene con la siguiente expresión:” (Especificación CFE J6100-54; 2011: 31)

$$G = \frac{2.94 * \Omega}{273 + \tau}$$

Donde:

- $\Omega$  Presión barométrica, en mm de Hg.
- $\tau$  Temperatura ambiente, en °C.

En la tabla 1.6. se presenta la relación entre los valores de la altitud  $h_m$ , en metros sobre el nivel del mar (msnm), y la presión barométrica,  $\Omega$ , en mm de Hg (mercurio).

<b>ALTITUD (msnm)</b>	<b>PRESIÓN BAROMÉTRICA (mm de hg)</b>
0	760
500	720
1000	675
1500	635
2000	600
2500	565
3000	530
3500	495

Tabla 1.6.- Relación entre Altitud y Presión Barométrica. (Para valores intermedios se debe interpolar)

Fuente: Especificación CFE J6100-54.

Obtención de presiones equivalentes sobre los componentes de una línea de transmisión.

Los postes troncocónicos son estructuras que por su alta relación de aspecto o las dimensiones reducidas de su sección transversal, son especialmente sensibles a las ráfagas de corta duración y cuyos periodos naturales largos favorecen la ocurrencia de oscilaciones importantes en la dirección del viento. Para el cálculo de presiones sobre la estructura de soporte y cables debe emplearse el análisis dinámico que permite evaluar los empujes ocasionados por la interacción dinámica entre el flujo del viento y se aplicará para calcular las cargas por viento que actúan sobre las estructuras prismáticas sensibles a los efectos dinámicos producidos por la turbulencia.

### **Presiones equivalentes sobre la estructura soporte ( $P_{ze}$ ).**

“Las presiones de viento sobre los componentes (estructura de soporte y cables) de la línea deben obtenerse considerando el efecto dinámico del viento. Estas presiones se deben obtener a partir de las presiones equivalentes que emplean factores de respuesta dinámica, los cuales dependen de las condiciones del flujo y de las propiedades dinámicas de los componentes.” (Especificación CFE J6100-54; 2011: 32).

Asimismo, también es necesario tomar en cuenta la forma del componente. En términos generales, la presión actuante sobre un sistema determinado de estructura de soporte y cables, se obtienen con la ecuación:

$$P_{ze} = F_{ge} * C_{ae} * q_z$$

Donde:

- P<sub>ze</sub>** Presión dinámica equivalente a la altura **z**, que se aplica en forma estática, en kg/m<sup>2</sup>.
- F<sub>ge</sub>** Factor de respuesta dinámica en la estructura soporte, adimensional.
- C<sub>ae</sub>** Coeficiente de arrastre, adimensional.
- q<sub>z</sub>** Presión dinámica de base a la altura de la torre **z**, en metros.

### Factor de respuesta dinámica de estructuras de soporte (**F<sub>ge</sub>**).

“Este factor corrige el valor de la presión del viento y se obtiene mediante la siguiente expresión:” (Especificación CFE J6100-54; 2011: 33).

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

Donde:

- g<sub>z</sub>** Factor de ráfaga, variable según la altura **z**, para convertir velocidades de un tiempo de promediación de 3 segundos a un tiempo de 10 minutos, adimensional.
- h** Altura total de la estructura sobre el nivel del terreno, en metros.
- h<sub>o</sub>** Altura de referencia de la estructura en metros (puede tomarse como 2/3h)
- α'** Factor de variación de potencia, para un tiempo de promediación de 10 minutos, adimensional. Se toma de la tabla 1.7., en función de la categoría del terreno.
- L<sub>s</sub>** Escala de turbulencia del viento, en metros.



**K** Factor de rugosidad del terreno, adimensional y se toma en función de la categoría del terreno de la tabla 4.

El primer término del radical en la ecuación toma en cuenta la respuesta cuasi-estática de las estructuras para frecuencias bajas, se elimina un segundo término que considera la resonancia en frecuencias cercanas a la frecuencia natural de la misma. La frecuencia de vibración de una estructura puede calcularse de forma exacta mediante un programa de análisis especializado. El manual ASCE propone eliminar el término resonante, el cual resulta muy pequeño en estructuras altas o con frecuencias mayores de 3 Hz. No obstante debe tenerse cuidado en torres bajas muy flexibles, particularmente en terrenos tipo 1 y 2.

<b>TERRENO TIPO</b>	<b>K</b>	<b>L<sub>s</sub></b>	<b>α'</b>
1	0.0030	72.10	0.121
2	0.0065	63.70	0.164
3	0.0142	53.50	0.216
4	0.0318	44.50	0.262

Tabla 1.7.- Factor de Rugosidad, escala de turbulencia del viento y factor de variación de potencia.

Fuente: Especificación CFE J6100-54.

### **Determinación del Coeficiente de arrastre.**

El valor del coeficiente de arrastre para cada sección de una estructura, se obtiene de la tabla 1.8 en función de su relación **H/b** (altura entre ancho de la caña) definida de la especificación de CFE J6100-54:

SECCIÓN TRANSVERSAL	RELACIÓN H/b			
	1	7	25	>40
<b>Circular</b> ( $b \cdot V_D \geq 6 \text{ m}^2/\text{s}$ )	0.80	1.00	1.20	1.20
<b>Circular</b> ( $b \cdot V_D < 6 \text{ m}^2/\text{s}$ )	0.70	0.80	1.20	1.20
<b>Poligonal</b> De 12 lados o más	0.80	1.00	1.20	1.20
<b>Hexagonal u octagonal</b>	1.00	1.20	1.40	1.40
<b>Cuadrada</b> (Viento normal a una cara)	1.30	1.40	2.00	2.20
<b>Cuadrada</b> (Viento sobre una esquina)	1.00	1.10	1.50	1.60

Tabla 1.8.- Coeficiente de arrastre para postes  $C_{ae}$

Fuente: Especificación CFE J6100-54.

Notas:

- El valor  $b$  es el diámetro o la dimensión horizontal de la estructura para evaluar el producto  $b \cdot V_D$ , este diámetro debe ser el que se localiza a dos tercios de la altura total, a partir del nivel de terreno en metros.
- $V_D$  es la velocidad del viento de diseño convertida en m/s, y valuada para los dos tercios de la altura total.

### Cálculo de presiones equivalentes sobre los cables ( $P_{zc}$ ).

“La presión dinámica equivalente que ejerce el viento sobre los cables se calcula con la siguiente expresión.” (Especificación CFE J6100-54; 2011: 35).

$$P_{zc} = 0.60 * F_{gc} * C_{ac} * q_z$$

Donde:

- $P_{zc}$**  Presión dinámica equivalente a la altura  $z$ , que se aplica en forma estática para cables,  $\text{kg/m}^2$ .
- 0.6** Factor que se aplica en base a las recomendaciones de la norma IEC (Comisión Nacional Electrotécnica).
- $F_{gc}$**  Factor de respuesta dinámica de cables, adimensional.
- $C_{ac}$**  Coeficiente de arrastre del cable, igual a la unidad para el caso de cables adimensional.
- $q_z$**  Presión dinámica de base a la altura sobre el terreno a la que se encuentre el centroide del grupo de cables, se debe tomar  $z=2/3$  de la altura total de la estructura del nivel más alto, en  $\text{kg/m}^2$ .

### Cálculo del factor de respuesta dinámica para cables.

“Este factor corrige el valor de la presión del viento, para tomar en cuenta las características dinámicas de los cables y del viento. Se calcula como:” (Especificación CFE J6100-54; 2011: 35).

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

Donde:

- $g_z$**  Factor de ráfaga, para convertir velocidades de un tiempo de promediación de 3 segundos a un tiempo de 10 minutos, adimensional.
- $z$**  Altura a la que se encuentra el centroide del cable a  $2/3 h$ , en m.
- $\alpha'$**  Factor de variación de potencia, adimensional. Está en función del tipo de terreno de la tabla 1.7.
- $L_s$**  Escala de turbulencia del viento, en metros, y se toma en función del tipo de terreno de la tabla 1.7.
- $K$**  Factor de rugosidad del terreno, es adimensional y se toma en función del tipo de terreno de la tabla 1.7.
- $L$**  Claro libre entre apoyos del tramo en consideración, en metros.

En forma similar al caso de estructuras, se tienen los términos de respuesta en el radical de la ecuación, el primero denominado de fondo y, el segundo de resonancia. Debido a que es poco probable que todos los cables de una misma línea presenten simultáneamente su valor de respuesta máximo, el código ASCE propone eliminar el término resonante, la cual es razonable para los casos comunes de líneas de transmisión.

Según cálculo del factor de ráfaga, para convertir velocidades de un tiempo de promediación de 3 segundos a un tiempo de 10 minutos:

“El factor de ráfaga  $g_z$ , es la relación entre la velocidad máxima promediada de un lapso de tiempo  $t_1$  (3 segundos), y otra promediada sobre un lapso de tiempo mayor

$t_2$  (10 minutos), el cual debe ser suficientemente largo para que las condiciones del flujo no afecten el valor promedio; se recomienda emplear un valor de una hora. Este factor puede obtenerse con la siguiente expresión:” (Especificación CFE J6100-54; 2011: 36)

$$g_z\left(\frac{t_1}{t_2}\right) = \frac{1 - \left\{ 0.6226 \left[ k \left( \frac{z}{\delta} \right)^\eta - \xi \right]^{1.2716} \ln\left(\frac{3}{3600}\right) \right\}}{1 - \left\{ 0.6226 \left[ k \left( \frac{z}{\delta} \right)^\eta - \xi \right]^{1.2716} \ln\left(\frac{600}{3600}\right) \right\}}$$

Donde:

$g_z\left(\frac{t_1}{t_2}\right)$  Factor de ráfaga entre velocidades promediadas sobre lapsos de  $t_1$  (3 segundos) y  $t_2$  (10 minutos), adimensional.

$k$ ,  $\eta$  y  $\xi$  son parámetros adimensionales, dependen de la turbulencia y de la rugosidad del sitio.

$\delta$  es la altura gradiente en metros y

$z$  es la altura sobre el terreno a la que se encuentra el centroide del cable considerado, en metros.

	CATEGORIA DEL TERRENO			
	1	2	3	4
$k$	0.391	0.382	0.369	0.363
$\eta$	-0.032	-0.054	-0.096	-0.151
$\xi$	0.295	0.265	0.227	0.195
$\delta$	245	315	390	455

Tabla 1.9.- Parámetros para determinar el Índice de turbulencia.

Fuente: Especificación CFE J6100-54.

## 1.6. Clasificación de las cargas.

Cuando se describen las cargas actuantes sobre una línea de transmisión, es importante distinguir entre los eventos que producen las cargas y las cargas resultantes de las componentes de los subsistemas. Las cargas son fuerzas que actúan directamente sobre los puntos de sujeción de las estructuras bajo un sistema ortogonal.

Las causas que producen las cargas se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Accidentales: debidas al viento, hielo, etc.
- Cargas que transmiten los cables a los postes.
- Construcción, tendido y mantenimiento.
- Peso propio de la estructura, cables, aisladores y herrajes.

**Las cargas por condiciones accidentales**, o eventos climáticos de interés son la velocidad de viento, el espesor de hielo (en caso de que exista), las temperaturas extremas (mínima y máxima). Los datos extremos de estas variables son importantes en aplicaciones de análisis y diseño. Siempre se consideran los valores más grandes, relativos a causas ambientales dadas, en un determinado periodo de tiempo; así como la velocidad de viento definida como la mayor dentro de un periodo de retorno, el espesor máximo de hielo acumulado y la temperatura máxima registrada para la revisión de libramientos, o bien, la temperatura mínima para la revisión de tensiones.

La velocidad de viento para el diseño se considera para un determinado periodo de retorno el cual puede ser de 50 y 10 años de acuerdo a lo descrito en la especificación CFE – J6100-54.

Las estructuras de las líneas de transmisión pueden estar sujetas a fuerzas dinámicas causadas por el viento, movimientos de cables y sismos. Estas fuerzas pueden provocar la vibración de una estructura completa, o bien, de uno de sus elementos.

De acuerdo a la experiencia, se ha observado que en las estructuras completas o en sus miembros no existe generalmente daño que repercuta en el diseño debido a vibraciones, ya que en la mayoría de los casos, los daños son ocasionados por el viento; el resultado de este tipo de vibración es:

1. Falla por fatiga de los miembros o conexiones.
2. Se puede perder la conexión de los tornillos.

**Las cargas que transmiten los cables a los postes**, se clasifican en tensiones mecánicas, deflexión, masa propia y presión de viento.

**Las cargas por construcción, tendido y mantenimiento**, se definen como las cargas a considerar en el diseño de las estructuras de soporte de líneas de transmisión para que tengan un margen de seguridad adecuado durante las operaciones de construcción y mantenimiento. Se requiere un cuidado especial en este proceso ya que es más probable que la falla de un componente de la línea cause pérdidas humanas. Estas cargas deben considerarse como medidas preventivas de naturaleza determinística.

Todos los componentes sometidos a cargas significativas durante las operaciones de construcción y mantenimiento deben diseñarse con un margen de

seguridad adecuado, de manera que se tenga una probabilidad muy baja de no exceder su magnitud bajo operaciones normales. Sin embargo, las cargas no deben gobernar el diseño de las estructuras, de lo contrario se alteraría la confiabilidad de la línea.

Las prácticas de construcción y mantenimiento deben regularse para eliminar cargas innecesarias y temporales, que de otra manera demandarían un reforzamiento costoso de las estructuras.

Las velocidades de viento que pueden tolerarse durante las maniobras, tienen un efecto despreciable sobre las estructuras y las cargas de viento se omiten en el análisis.

Las cargas por mantenimiento son aplicadas en puntos de soporte de los cables en los cuales se considere que se realiza la maniobra y estas cargas estarán de acuerdo a lo indicado en la especificación CFE J6100-54 para postes, y son resultado de una inspección programada, por emergencia o bien por remplazo de toda o parte de la estructura; así mismo para cambios parciales o totales de los hilos de guarda, aisladores, conductores y herrajes.

Las cargas anteriores se especifican debido a que durante las maniobras de izamiento o descenso de alguna fase, se incrementan los claros de peso de las estructuras de soporte adyacentes y la tensión mecánica en la fase donde se efectúa la maniobra.



**Las cargas por peso propio**, aunque por naturaleza son permanentes, estas cargas varían de un poste troncocónico a otro, debido a la variación de la altura de estos y el claro de peso de los cables.

La confiabilidad de la línea sometida solo a las cargas muertas debe ser prácticamente del 100%. Esta confiabilidad se logra cumpliendo los requisitos de seguridad de cargas por construcción y mantenimiento.

El peso de los conductores soportados por las estructuras es el producto del peso por unidad de longitud, que es prácticamente constante y el claro de peso el cual puede variar de acuerdo con el espaciamiento y elevación de tales estructuras y tensión del conductor.

Para el caso de zonas con presencia de hielo se debe considerar el peso de cables con por lo menos 5 mm de diámetro, de acuerdo a la especificación CFE J6100-54, la consideración de este dato solo se llevará a cabo si existen evidencias de acumulación periódica de hielo sobre los cables.

Además de las cargas propias de la estructura, de los cables con o sin hielo, se debe tomar en cuenta también el peso de aisladores para la determinación de los árboles de carga.

### **1.7. Cargas para diseño.**

Es conveniente considerar un sistema de coordenadas ortogonales bien definido en el que se desglosen las cargas verticales, transversales y longitudinales actuantes.

Estas cargas se identifican como un subsistema de cargas el cual se traslada al punto de sujeción en los brazos de los postes troncocónicos para realizarse un análisis puntual. Este proceso determina un análisis de la estructura dentro de los parámetros de seguridad y confiabilidad que el sistema requiere.

Las cargas verticales de una estructura de transmisión están dadas por el peso gravitacional de las partes componentes de un sistema, estos son por el peso de cables (conductor, hilo de guarda), accesorios y herrajes, peso de la estructura y en su caso el peso debido al hielo.

Las cargas transversales son aquellas debidas a la presión de viento sobre la estructura y los cables, además de las componentes debidas a las tensiones mecánicas de los cables.

Las cargas longitudinales, son las cargas correspondientes a las tensiones mecánicas de los cables y a la descomposición de las cargas debidas a la presión de viento sobre los cables cuando existen cambios de dirección en la trayectoria.

Las estructuras en deflexión deben ser desarrolladas para resistir las cargas longitudinales desbalanceadas producidas por el viento o hielo en los claros adyacentes de diferente longitud.

Las principales cargas a considerar en el diseño de postes para líneas de transmisión son:

- a) Cargas que transmiten los cables.

1. Deflexión
  2. Tensión mecánica
  3. Masa propia y
  4. Presión de viento.
- 
- b) Acción del viento sobre el poste.
  - c) Masa propia del poste.
  - d) Masa de las cadenas de aisladores y herrajes.
  - e) Por construcción y mantenimiento, solo para el diseño de los brazos.
  - f) Por acumulación de hielo (si se justifica su presencia).

### **1.8. Identificación de las cargas.**

En las condiciones básicas de carga empleadas para el análisis y diseño de los postes se identifican las cargas con la siguiente nomenclatura en base a los lineamientos que establece la especificación CFE J6100-54.

- PC** Carga vertical, en kg, debida a la masa de los cables conductores y de guarda.
- PCH** Carga vertical, en kg, debida al hielo acumulado en los cables.
- PA** Carga vertical, en kg, debida a la masa de los aisladores, herrajes y accesorios.
- PE** Masa propia del poste, en kg.
- PVM** Carga vertical de montaje para el diseño de los brazos: 300 kg para los brazos de guarda y 500 kg para los brazos de conductor.

- VC** Carga transversal, en kg, debida a la acción del viento máximo.
- VCH** Carga transversal, en kg, debida a la acción del viento reducido sobre los cables ante la presencia de hielo acumulado.
- VM** Velocidad regional máxima de viento, para un periodo de retorno de 50 años.
- VR** Velocidad reducida de viento. Se considera igual al 50% de la velocidad regional máxima para un periodo de retorno de 10 años.
- VE** Fuerza transversal, en kg, producto de la acción del viento VM sobre el poste.
- VEH** Fuerza transversal, en kg, debida de la acción del viento VR sobre el poste.
- FL** Fuerza longitudinal, en kg, debida a la tensión mecánica de los cables.
- CT** Componente transversal, en kg, producto de la tensión máxima de los cables debida a la deflexión de la línea.

### **1.9. Combinaciones y factores de carga.**

Las combinaciones y factores de carga para postes de líneas de transmisión se enlistan en la tabla 1.10, que deben cumplir los diseños de postes troncocónicos para todas las líneas de transmisión con sus diferentes hipótesis de carga que considera la especificación CFE J6100-54 Postes metálicos para líneas de transmisión y subtransmisión.

Hipótesis de carga	Combinación de carga	Deform. Permissible	Viento
Servicio (suspensión)	$(PC+PA+PE) * 1.0$	2%	-----
Servicio (deflexión)	$(PC+PA+PE+CT) * 1.0$	3%	-----
Servicio (remate)	$(PC+PA+PE+FL+CT) * 1.0$	3%	-----
Servicio (transición)	$(PC+PA+PE+FL+CT) * 1.0$	1%	
Máxima (Suspensión)	$(PC+PA+PE+VC+VE) * 1.16$	-----	VM
Máxima (deflexión)	$(PC+PA+PE+VC+VE+CT) * 1.26$	-----	VM
Máxima (remate)	$(PC+PA+PE+VC+VE+FL+CT) * 1.26$	-----	VM
Tendido y Mantenimiento	$(PC+PA+PE+PVM+FL+CT) * 1.0$	-----	-----

Combinaciones de carga con hielo			
Máxima (Suspensión)	$(PCH+PA+PE+VCH+VEH) * 1.16$	-----	VR
Máxima (deflexión)	$(PCH+PA+PE+VCH+VEH+CT) * 1.26$	-----	VR
Máxima (remate)	$(PCH+PA+PE+VCH+VEH+FL+CT) * 1.26$	-----	VR

Tabla 1.10.- Combinaciones y factores de carga para postes troncocónicos.  
Fuente: Especificación CFE J6100-54.

#### Consideraciones adicionales que establece la Especificación CFE J6100-54:

- “En caso de postes que deban llevar dos o más conductores por fase, se toma el empuje del viento sobre el área proyectada de todos los conductores.
- En el caso de los postes de doble circuito, se deben considerar para el diseño las hipótesis de carga para un circuito instalado en disposición vertical, con dos cables de guarda.

En el caso de postes de cuatro circuitos, se deben considerar en el diseño las hipótesis de carga para dos circuitos instalados en los brazos superiores y un

circuito en posición vertical y la hipótesis de dos circuitos instalados en un solo lado en posición vertical.

- El diseño de los brazos y su sujeción al fuste se debe realizar considerando todas las combinaciones de carga. Las cargas PVM para todos los tipos de postes se deben sumar a las cargas de servicio.
- La carga PCH se presenta cuando en los cables se ha acumulado una capa de hielo de 5 mm de espesor, con un peso específico de 8.8 kN/m<sup>3</sup>.
- Las estructuras para las que se indique condición de hielo y sin hielo, deben analizarse conforme a las tabla 10.
- En los postes de remate se debe considerar una hipótesis de carga adicional de viento longitudinal en el mismo.
- La combinación de carga de tendido se debe aplicar a todos los tipos de postes a excepción de los que se diseñen para sostener crucetas aislador articuladas en los cuales se debe aplicar la carga de tendido y mantenimiento solo en brazos para hilo de guarda.
- Para el cálculo de cargas transversales de tendido y mantenimiento solo se debe considerar una vez la componente transversal CT.
- La aplicación de la carga por tendido y mantenimiento debe ser solo en una fase a la vez.”(Especificación CFE J6100-54; 2011: 8)

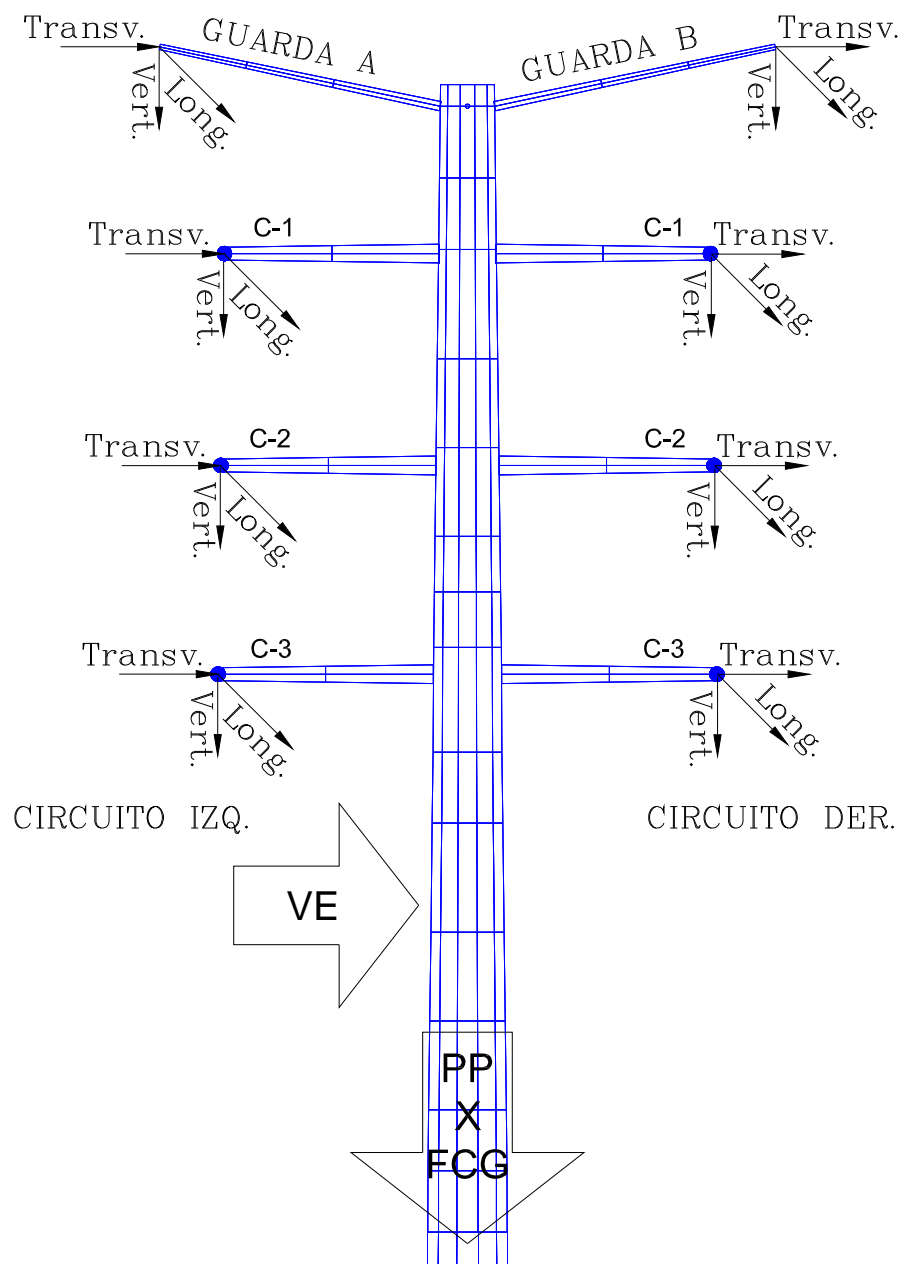


Figura 1.1.- Silueta de árbol de cargas característico.

Fuente: Propia.

## **CAPÍTULO 2**

### **ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE POSTES TRONCOCÓNICOS Y DISEÑO DE SUS CIMENTACIONES ASISTIDO POR COMPUTADORA**

En este capítulo se describen los conceptos de tensiones mecánicas de los cables, así como las hipótesis de carga para cálculo de flechas, que dan pauta para realizar el análisis y diseño de los postes metálicos mediante software especializado, culminando con el análisis de sus cimentaciones, información que forma parte para el desarrollo sustentable de la presente investigación.

#### **2.1. Concepto de análisis y diseño estructural.**

El análisis y diseño estructural de postes metálicos, es el proceso mediante el cual se determina la respuesta de una estructura a cargas o acciones específicas que la afectan, esta respuesta generalmente se mide cuantificando las fuerzas internas y las deformaciones en toda la estructura para definir los requisitos de seguridad y funcionalidad.

El objetivo del diseño mecánico de cables es analizar la importancia que tiene la selección adecuada de los parámetros mecánicos de tensión de los cables, en el diseño y posterior funcionamiento de una línea de transmisión. Se presentan las diferentes estrategias que se manejan dependiendo de las características del sitio de la trayectoria de una línea de transmisión.



La determinación previa y controlada de los parámetros de diseño para las catenarias de los cables, así como de las tensiones de trabajo para los diferentes condiciones climáticas y topográficas en una línea de transmisión, permiten prever que el comportamiento de los cables instalados, cumpla con requerimientos en base a las condicionantes de las especificaciones de CFE.

1. Tensiones de trabajo, con valores dentro de los límites designados por la CFE.
2. Tensiones horizontales en estado de temperatura diaria, equilibradas en todos los tramos. Esto con objeto de evitar tensiones diferenciales en las torres de anclaje.
3. Optimización del diseño de localización de estructuras, en el perfil topográfico.

Los estudios se realizan tomando en consideración la siguiente información y condicionantes.

- Tensiones mecánicas admisibles en los cables.
- Tensiones mecánicas admisibles que soportan las estructuras de la línea de transmisión.
- Características climáticas de la zona.
- Propiedades físicas y mecánicas de los cables.
- Limitaciones reglamentarias impuestas.
- Claros y desniveles de la localización preliminar de estructuras.
- Claros equivalentes en la línea.

## 2.2. Determinación de las flechas y tensiones mecánicas de los cables.

El cálculo de flechas y tensiones mecánicas en los cables de una línea de transmisión es fundamental por varias razones: para localizar las estructuras de soporte de manera que se cumplan las distancias de libramiento en todas las condiciones ambientales previstas para el proyecto, para calcular las cargas mecánicas que transmitirán los cables a las estructuras de soporte, para definir las flechas correspondientes al tendido inicial, para limitar los daños por fatiga en los cables debidos a la vibración eólica y para limitar las tensiones máximas bajo solicitaciones extremas con el propósito de evitar daños mecánicos en los cables.

Para calcular la configuración de los cables y determinar las flechas y tensiones correspondientes, en función de las cargas por unidad de longitud y de los claros, en la práctica se recurre a uno de estos dos métodos:

**Método de la Catenaria:** Considera una carga uniforme constante en el cable por unidad de longitud. Utiliza funciones hiperbólicas; en teoría es exacto, pero debido a la complicación de trabajar con funciones hiperbólicas, el cálculo se torna complicado.

**Método de la Parábola:** Al igual que en el método de la catenaria considera una carga uniforme constante en el cable por unidad de longitud del claro. Los errores introducidos por este método serán insignificantes en la práctica para los claros menores a 600 metros y apoyos aproximadamente al mismo nivel.

Normalmente el usuario utilizará algún programa de computadora para realizar el cálculo de flechas y tensiones correspondientes a varias condiciones en las que cambia

la carga y/o la temperatura. Debido a lo mencionado anteriormente se recomienda utilizar el método de la catenaria, ya que todos los cálculos los realizará la computadora.

Las condiciones, inicial y final de longitud, flecha, tensión y temperatura se refieren a las características de la curva que adopta el cable en cualquier momento de su vida. El módulo de elasticidad y el coeficiente de dilatación térmica se refieren a las propiedades del cable al momento de su colocación para el caso inicial, y después del flujo plástico (años después de su colocación), para la condición final.

### **2.3. Hipótesis para el cálculo de flechas y tensiones.**

Las hipótesis, para las que deben calcularse las flechas y tensiones en los cables de líneas de transmisión están basadas en la especificación de CFE CPTT-DDLT-001/02 “Especificación para diseño de líneas de transmisión aéreas” enlistadas a continuación:

1. **Tensión diaria (EDS, Every Day Strength), se considera temperatura media, sin viento y sin hielo.** Esta condición se analiza para limitar la vibración eólica y para definir las fuerzas longitudinales a aplicar en las estructuras de soporte. La tensión diaria es la que corresponde a las condiciones de temperatura media ambiental, no hay viento ni hielo. La tensión mecánica varía típicamente entre el 20% y 22% de la tensión de ruptura para cables ACSR (Aluminum-Clad Steel Reinforced) Cables de Aluminio con Alma de Acero. La longitud del cable para esta condición ya incluye una cierta elongación debida al flujo plástico.
2. **Flecha máxima, sin viento, sin hielo y temperatura máxima.** Nos sirve para revisar libramientos para la localización de la estructura sobre el perfil de la línea.

Para encontrar la flecha máxima se considera la tensión diaria como condición inicial, incluyendo deformaciones causadas por el flujo plástico. La temperatura final se iguala con la temperatura máxima esperada así como los módulos de elasticidad inicial y final, coeficientes de dilatación, y se calcula la flecha con alguno de los dos métodos mencionados anteriormente.

3. **Viento máximo y sin hielo.** Sirve para limitar daños en los propios cables por carga máxima y para revisar las cargas longitudinales de las estructuras de soporte. En esta condición se necesita obtener la presión y la fuerza equivalente que el viento ejerce sobre los cables en la dirección perpendicular al eje de los mismos. Las flechas y tensiones obtenidas para esta condición se utilizan para hacer una revisión mecánica a las cargas que se aplicarán en las estructuras al momento en que se presenten estas condiciones, en la zona donde se encuentra localizada la línea de transmisión. Rigurosamente, la temperatura final para esta condición es la que se presenta cuando ocurre el viento máximo; en nuestro país, esta puede comprender las temporadas primavera – otoño, mientras que en otros se presenta en la temporada de invierno; sin embargo, se propone emplear la temperatura mínima del sitio, aun cuando esto resultara conservador para los lugares en los que el viento máximo se presenta en otra estación del año.
4. **Viento reducido, con hielo y con temperatura mínima.** Se utiliza para conocer las cargas máximas a que estarán expuestos los cables y las estructuras en condiciones extremas. El procedimiento para calcular las fuerzas del efecto del viento es el mismo que para la condición anterior, con excepción de las velocidades, ya que estas deben ser las correspondientes al caso en el que se pueda presentar hielo. Asimismo, el peso del hielo debe tomarse en cuenta para

calcular las flechas y tensiones. Se considera  $900 \text{ kg/cm}^3$  como peso volumétrico del hielo. El diámetro del cable a considerar para determinar las fuerzas se deberá agregar un espesor del hielo de 5 mm.

- Flechas y tensiones para tendido, sin viento, sin hielo y para diferentes temperaturas.** Sirve para definir la flecha que debe tener el cable cuando se realiza el tendido de la línea.

#### 2.4. Ecuación del cambio de estado.

Método de la ecuación del cambio de estado. Para determinar las tensiones iniciales y finales en una línea de transmisión o subestación, se puede hacer uso de la ecuación del cambio de estado; esta ecuación establece que a partir de ciertas condiciones dadas, es posible obtener el comportamiento de los parámetros del cable para condiciones diferentes de las anteriores. Corresponde a una ecuación de tercer grado de la forma  $x^3 - Px^2 - Q = 0$

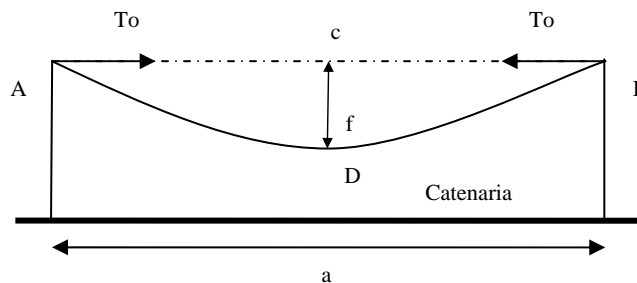


Figura 2.1.- Elementos principales para el análisis de flechas y tensiones

Fuente: Propia

La longitud “L” de la curva ADB de la figura anterior está dada por la ecuación:

$$L = a + \frac{8 * f^2}{3 * a} \quad \dots (1)$$

La relación entre la longitud “L” del conductor y el claro “a” se expresa por:

$$\frac{L}{a} = 1 + \frac{8}{3} \left( \frac{f}{a} \right)^2 \quad \dots (2)$$

Esta relación puede calcularse como la relación To/T simplemente conociendo la flecha y el claro del conductor.

En la ecuación de cambio de estado de un conductor tendido entre dos puntos, designaremos  $\alpha$  como el coeficiente de dilatación térmica del conductor. Bajo la influencia de un cambio de temperatura dada por  $(\theta' - \theta)$  un conductor que tiene una longitud “L” a la temperatura  $\theta'$  de una longitud igual por definición a  $L + L\alpha (\theta' - \theta)$ . Pero como el conductor está fijo en sus dos extremos, su alargamiento modificará sólo la tensión la cual está dada por el valor de  $\sigma'$ . Designemos por  $M_o$  el módulo de elasticidad del cable bajo la influencia de una variación de tensión  $\sigma' - \sigma$ , la longitud del conductor sufrirá una variación igual.

$$L * \frac{\sigma' - \sigma}{M_o} \quad \dots (3)$$

Resulta entonces que la variación de longitud  $L - L'$  del conductor bajo la influencia simultánea de la variación de la temperatura  $\theta' - \theta$  y la de la tensión  $\sigma' - \sigma$ , tiene por expresión.

$$L' - L = L\alpha(\theta' - \theta) + L * \frac{\sigma' - \sigma}{M_o} \quad \dots (4)$$

Por otro lado, la variación de longitud  $L' - L$  puede expresarse de otra forma tomando en cuenta la siguiente ecuación.

$$T = \frac{wa^2}{8f} \quad L = a \left( 1 + \frac{w^2 * a^2}{24\sigma^2} \right) \quad \dots (5)$$

De donde:

$$L' - L = \frac{a^2}{24} * \left( \frac{w'^2}{\sigma'^2} - \frac{a^2}{\sigma^2} \right) \quad \dots (6)$$

Donde:

$w$  = Peso específico del cable =  $w_c/A$ .

$w'$  = Peso específico ficticio del cable para el segundo estado.

$w_c$  = Peso del cable kg/m/mm<sup>2</sup>.

$A$  = Área del cable, mm<sup>2</sup>.

Igualamos las fórmulas (3) y (6) tenemos.

$$L\alpha(\theta' - \theta) + L \left( \frac{\sigma' - \sigma}{E} \right) = \frac{a^2}{24} * \left( \frac{w'^2}{\sigma'^2} - \frac{a^2}{\sigma^2} \right)$$

Si se iguala la longitud "L" con el claro "a" se puede dividir los términos y se tiene:

$$\alpha(\theta' - \theta) + \left( \frac{\sigma' - \sigma}{M_o} \right) = \frac{a^2}{24} * \left( \frac{w'^2}{\sigma'^2} - \frac{a^2}{\sigma^2} \right)$$

Quedando la forma general, designando por "m" un coeficiente de sobrecarga definido como la relación del peso ficticio al peso real del conductor en el estado buscado  $\theta$  y  $\sigma$  por  $m'$ , entonces la ecuación se puede escribir como:

$$\sigma_f^2 \left[ \sigma_f + \frac{w^2 M_o m_i^2 C_b^2}{24 \sigma_f^2} + \alpha M_o [\theta_f - \theta_i] - \sigma_i \right] = \frac{w^2 M_o m_f^2 C_b^2}{24}$$

Donde:

- $w$  = Peso específico =  $w_c/A$ , kg/m/mm<sup>2</sup>.
- $\sigma', \sigma$  = Esfuerzo de tensión final e inicial =  $T_0/A$ , kg/mm<sup>2</sup>.
- $T_0$  = Tensión horizontal inicial, kg.
- $T$  = Tensión horizontal final, kg.
- $M_0$  = Módulo de elasticidad, kg/mm<sup>2</sup>.
- $\alpha$  = Coeficiente de dilatación, 1/°C.
- $m', m$  = Coeficiente de sobrecarga final e inicial adimensional.
- $\theta', \theta$  = Temperatura final e inicial, °C.
- $a$  = Claro considerado, m.
- $A$  = Área del conductor, mm<sup>2</sup>.

El coeficiente de sobrecarga se expresa de la siguiente manera:

$$m = \sqrt{\frac{(w_c + wh)^2 + Vc^2}{w_c^2}}$$

Donde:

- $w_c$  = Peso del conductor, kg.
- $wh$  = Peso del hielo sobre el conductor, kg.
- $Vc$  = Viento transversal, kg/m<sup>2</sup>.
- $yh$  = peso específico del hielo, kg/m<sup>3</sup>.
- $eh$  = Espesor del hielo, m.



dc = diámetro del conductor, m.

Pvto = Presión de viento actuando en los cables, kg/m<sup>2</sup>.

Finalmente la tensión al estado buscado es:

$$T = \sigma' * A$$

La flecha al centro del claro es :

$$f = p \left[ \cosh\left(\frac{a}{2p}\right) - 1 \right]$$

Donde:

P = Parámetro, adimensional

$$P = \frac{T}{w}$$

### **Ecuación de la catenaria.**

Para el análisis de los cables en una línea de transmisión o subestación eléctrica, se deben considerar sus características mecánicas y poder predecir su comportamiento bajo diferentes condiciones climáticas. Como primera etapa se considera utilizar las fórmulas de la catenaria que se definen a continuación.

Cuando se tiene un hilo pesado, homogéneo e inextensible y flexible, suspendido entre dos puntos fijos, la curva formada se llama catenaria. Debido a que los cables son extensibles, dentro del cálculo de flechas y tensiones, es aceptable la utilización de dichas fórmulas.

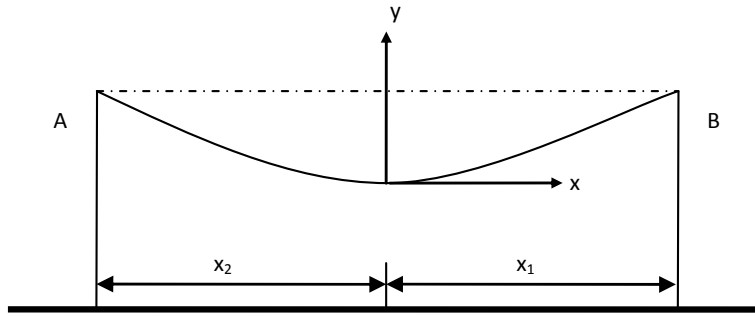


Figura 2.2.- Catenaria Típica.

Fuente: Propia

Ecuación de la Catenaria:

$$y = p \left[ \cosh \frac{x}{p} - 1 \right]$$

Parámetro:

$$p = \frac{T_0}{w}$$

Ecuación de la catenaria en función de la tensión horizontal:

$$y = \left( \frac{T_0}{w} \right) \left[ \cosh \frac{x}{\left( \frac{T_0}{w} \right)} - 1 \right]$$

Donde:

x,y = Ordenadas.

p = Parámetro, adimensional.

T<sub>0</sub> = Tensión horizontal inicial, kg.

W = Peso del conductor, kg.

Otro criterio de análisis es la considerar al cable como una parábola, en general se aplican las ecuaciones de la parábola para claros cortos y la catenaria en claros largos.

## Ecuación de la flecha.

La flecha de regulación se define como la máxima distancia vertical entre la recta imaginaria que une los puntos de sujeción del cable. Siempre la flecha máxima estará al centro del claro considerado si en el cable no tenemos contrapesos adicionales u algún otro elemento que cambie el comportamiento mecánico - geométrico.

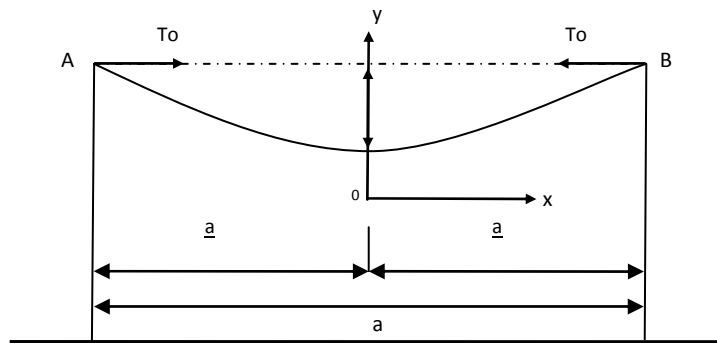


Figura 2.3.- Flecha de regulación

Fuente: Propia

La ecuación de la flecha de regulación con puntos fijos (A y B) desnivelados es:

$$f = p * \cosh\left(\frac{x_3}{p}\right) \left[ \cosh\left(\frac{a}{2p}\right) - 1 \right]$$

La ecuación de la flecha de regulación con puntos fijos (A y B) sin desnivel es:

$$f = p \left[ \cosh\left(\frac{a}{2p}\right) - 1 \right] = \frac{To}{w} \left[ \cosh\left(\frac{a}{2\left(\frac{To}{w}\right)} - 1 \right) \right]$$

Donde:

x, y Ordenadas.

f Flecha de regulación, m.

p Parámetro = To/w, adimensional.

To Tensión horizontal, kg.

w Peso del conductor, kg.

d Desnivel entre apoyos fijos (A y B), m.

$x_3$  Distancia horizontal del centro de la catenaria al centro del claro, m.

$$x_3 = p * \sinh^{-1} \left[ \frac{\frac{d}{2}}{p * \sinh\left(\frac{2}{2p}\right)} \right]$$

Algunos criterios de análisis para calcular la flecha es tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

Si el claro es menor a la mitad del parámetro se asimila la catenaria a una parábola.

$$\text{si } a \leq \frac{p}{2} \quad \begin{array}{l} d \leq \frac{a}{10} \text{ La flecha será: } f = \frac{a^2}{8p} \\ d > \frac{a}{10} \text{ La flecha será: } f = \frac{a\sqrt{a^2 + d^2}}{8p} \end{array}$$

Si el claro es mayor a la mitad del parámetro, se utilizarán los dos primeros términos de la catenaria.

$$\text{si } a > \frac{p}{2} \quad \begin{array}{l} d \leq \frac{a}{10} \text{ La flecha será: } f = \frac{a^2}{8p} + \frac{a^4}{384p^3} \\ d > \frac{a}{10} \text{ La flecha será: } f = \frac{a\sqrt{a^2 + d^2}}{8p} + \frac{a^3\sqrt{a^3 + d^3}}{384p^3} \end{array}$$

Donde:

f = Flecha de regulación, m.

p = Parámetro, adimensional.

To = Tensión horizontal inicial, kg.

- W = Peso del conductor, kg.  
d = Desnivel entre apoyos fijos (A y B), m.

## 2.5. Criterios de diseño.

Una línea de transmisión es confiable cuando realiza su función para diferentes condiciones durante un periodo determinado que generalmente es su vida útil. En virtud de que la confiabilidad es un término probabilístico, se entiende que las cargas de diseño pueden ser excedidas en cualquier momento.

Dada la esbeltez de los postes metálicos, su diseño debe considerar los efectos del viento sobre ellos en dos direcciones, horizontales y perpendiculares e independientes entre sí, así como las cargas asociadas con todos sus componentes y los efectos generados por las tensiones mecánicas de los cables.

Las cargas que intervienen en el diseño de las líneas de transmisión y subtransmisión pueden ser del tipo probabilísticas o determinísticas, con la particularidad de que ambas no son exactas, dependen de la precisión con que se obtienen; estas son:

- Verticales. Debidas a la masa de los cables, herrajes, aisladores y estructura.
- Transversales a la línea. Debidas a la acción del viento sobre cables y estructura, así como las ocasionadas por la deflexión de la misma línea.
- Longitudinales. Generadas por la tensión mecánica de los cables.

Se recomienda que las condiciones de carga que intervienen en el diseño estructural se representen en la forma de árboles de carga, usando un sistema coordinado ortogonal.

Las cargas de los cables deben mostrarse en los puntos de sujeción de los mismos, a dichas cargas deben incluirse el peso de herrajes y aisladores

En los últimos años, se han propuesto muchas técnicas de diseño basadas en la confiabilidad. Dentro de éstas, las que han recibido mayor atención son las propuestas por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) y la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC).

Las Propuestas del ASCE e IEC para el diseño de las estructuras de soporte para líneas de transmisión son muy similares. Ambos procedimientos ofrecen el uso de cargas estáticas y datos de resistencia que generan diseños con niveles consistentes de confiabilidad para diferentes materiales y en diversas condiciones climáticas.

Dentro de las diferencias más significativas entre criterios radica que con el procedimiento del ASCE se puede cuantificar el comportamiento de los componentes individuales (perfiles estructurales, conexiones, cimentaciones, etc.) mientras que sus efectos en la confiabilidad de la línea en su conjunto no se pueden cuantificar.

El método desarrollado por el ASCE es sencillo de utilizar, tiene la ventaja de intervenir directamente en los componentes y usar datos climáticos y de resistencias que se encuentran generalmente disponibles.

La metodología para evaluar las solicitaciones estructurales de soporte empleada en CFE, está basada en ambos métodos (ASCE e IEC), considerando a una línea de transmisión como un sistema integrado por una serie de componentes. La coordinación de resistencia contempla a la estructura de soporte como el componente más débil, le siguen las cimentaciones, los conductores, los aisladores y, por último, los herrajes.

Es importante que la estructura sea modelada adecuadamente, los modelos deben contener un número suficiente de elementos para garantizar que las deflexiones de los miembros sean representadas adecuadamente, y el punto de esfuerzo máximo sea definido con exactitud.

Para calcular los esfuerzos y las deformaciones en los postes Truncocónicos se ha seguido tradicionalmente un análisis elástico. La respuesta de las estructuras tubulares de transmisión a las cargas aplicadas es generalmente no lineal; esta se debe a los grandes desplazamientos, redistribución de esfuerzos, fluencias locales y la dependencia de las rigideces estructurales de los miembros. Con base a lo anterior, los análisis para postes deben realizarse del tipo NO LINEAL. Los métodos de análisis empleados en la práctica están basados en el método del elemento finito considerando la no linealidad de los desplazamientos. Los programas de cómputo desarrollados para este fin consideran los efectos de grandes desplazamientos y la dependencia de las rigideces estructurales en los niveles de esfuerzo de los miembros, son capaces de calcular el fenómeno de estabilidad elástica (pandeo), además de haber eliminado virtualmente el uso de métodos elásticos lineales (ASCE).

La mayoría de los postes de transmisión son telescopiados, por lo que reviste gran importancia la fuerza de acoplamiento entre secciones como el equipo utilizado.

La longitud de acoplamiento debe ser por lo menos 1.5 veces el diámetro interior de la sección hembra, esta longitud teórica debe estar marcada por el fabricante en cada sección macho por acoplar.

El poste puede ensamblarse en posición horizontal o vertical, la horizontal resulta ser la más recomendable dada la versatilidad que representa. En cuanto al equipo de acoplamiento se ha empleado tradicionalmente montacargas, sin embargo, la práctica de años recientes ha demostrado que el empleo de equipo hidráulico resulta ser lo más recomendable, dado que se aplica la fuerza necesaria simultáneamente, esto minimiza las deformaciones en los traslapes y evita las fallas locales.

El tener diseños de postes para cada línea de transmisión representa un catálogo muy grande de estructuras, con la finalidad de minimizar este problema, se recomienda tener estructuras normalizadas con claros y deflexiones que puedan adaptarse a la gran diversidad de condiciones que se presentan en las zonas urbanas y suburbanas del país; es decir, el emplear de manera óptima una estructura en cualquier lugar del país.

El esfuerzo último, de acuerdo con el criterio de Hecky-Mises, tiene tres componentes: axial, flexión y torsión. La aportación de los esfuerzos axiales y torsionantes son insignificantes en comparación con el flexionante, por lo que de manera preliminar los dos primeros pueden despreciarse.



El problema de la utilización mecánica se circunscribe en encontrar los claros máximos para los cuales se satisface la ecuación anterior al variar:

- Tipo de conductor.
- Tipo de cable de guarda.
- Velocidad de viento de diseño.
- Deflexión de la Línea de Transmisión.
- Tensiones mecánicas de los cables.

## **2.6. Análisis y diseño de postes metálicos.**

El análisis y diseño de postes de transmisión se realiza a través del uso de herramientas como la computadora y programas destinados para tal efecto; uno de los programas utilizados en el diseño de estas estructuras es el software PLS POLE.

Este programa de computadora, es un módulo del programa de diseño de líneas de transmisión denominado PLS-CADD, creado en la Universidad de Madison, Wisconsin. En los Estados Unidos de América.

Este software fue desarrollado para realizar un análisis de estructuras de transmisión del tipo no lineal, para efectos geométricos de segundo orden, análisis de desplazamientos, además de calcular los esfuerzos en algunos puntos a lo largo del poste y compararlos con los valores permisibles descritos en el manual ASCE, el programa calcula los esfuerzos y los compara con valores permisibles.

## Modelado de postes troncocónicos en software PLS-POLE.

Para iniciar el proceso de análisis mediante el uso del programa PLS POLE, se deben considerar los siguientes aspectos:

1. Geometría general de la caña.
2. Geometría general de los brazos.
3. Propiedades del acero estructural a utilizar.
4. Combinaciones de cara con las que se diseñará la estructura.

A continuación se desarrolla una guía práctica para el uso del software: **PLS POLE:**

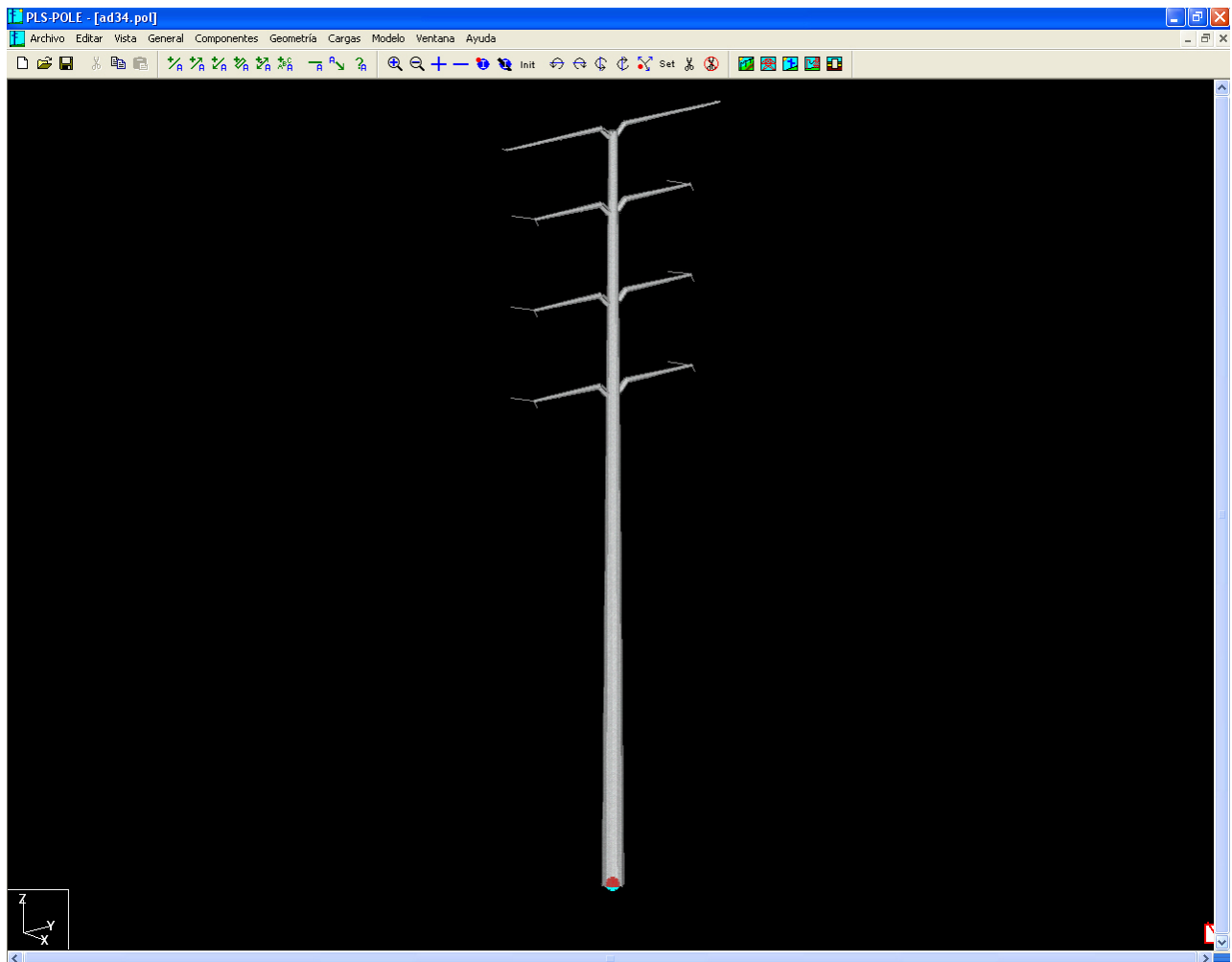


Figura 2.4.- Presentación software PLS-POLE

Fuente: Propia

## Se definen las preferencias para el análisis del poste:

Se comienza definiendo el nombre del proyecto, así como las preferencias del proyecto, donde se definirá el sistema de unidades, tipo de letra para reportes, rutas de ubicación para las librerías generadas con el software, entre otros.

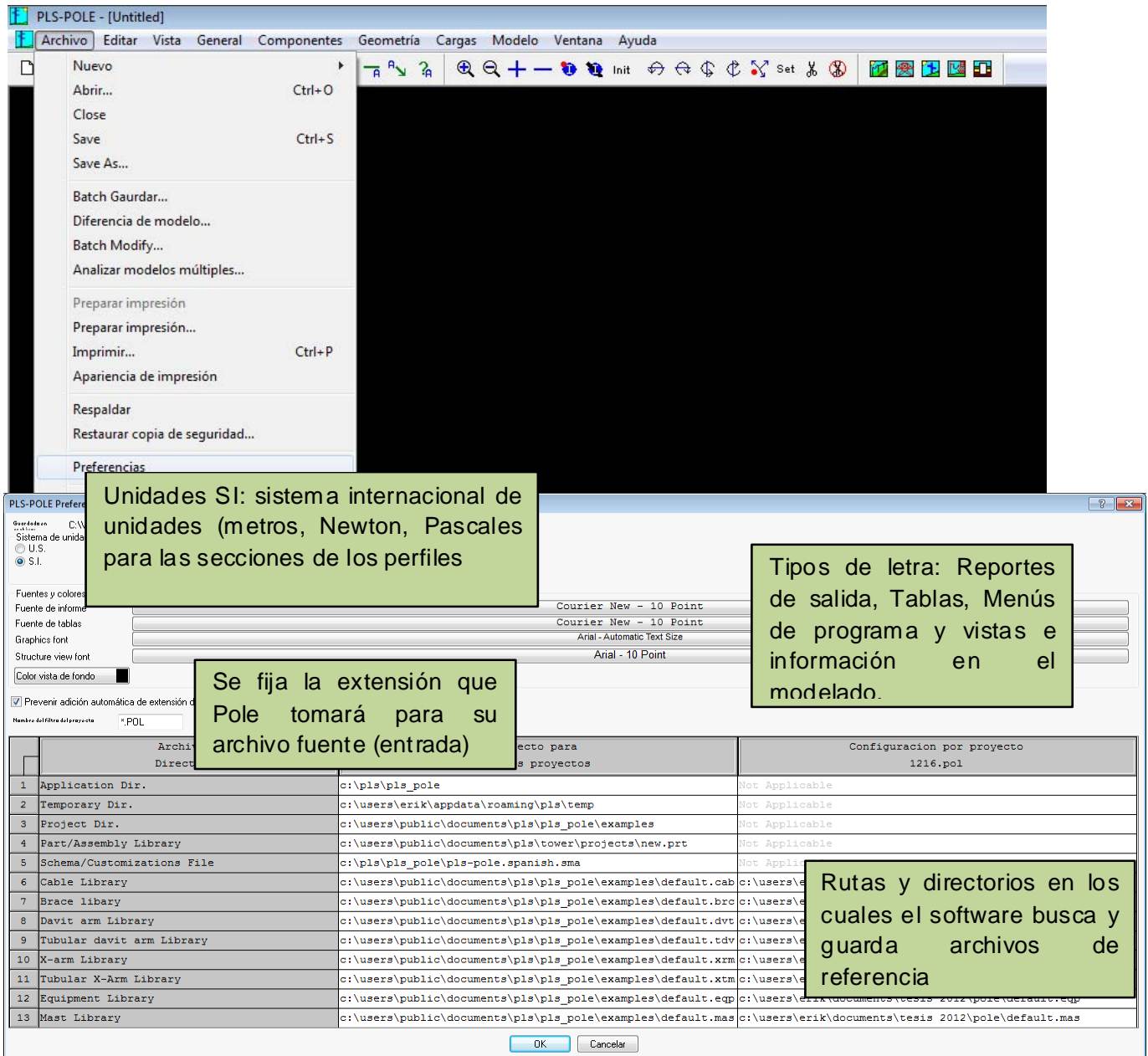


Figura 2.5.- Entrada del menú preferencias

Fuente: Propia

Posteriormente se identifica el tipo de proyecto, código de revisión estructural y tipo de análisis a desarrollar:

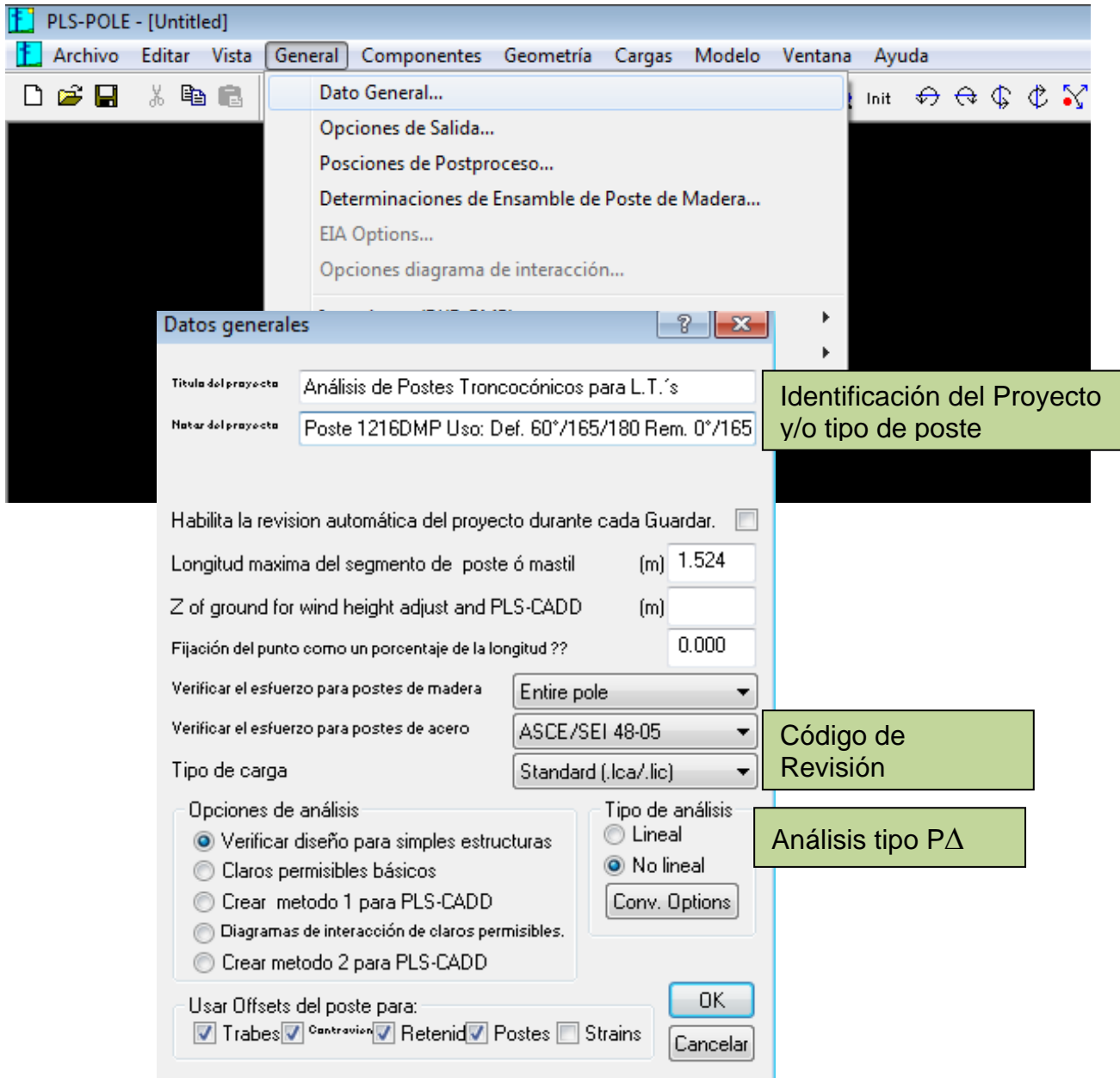
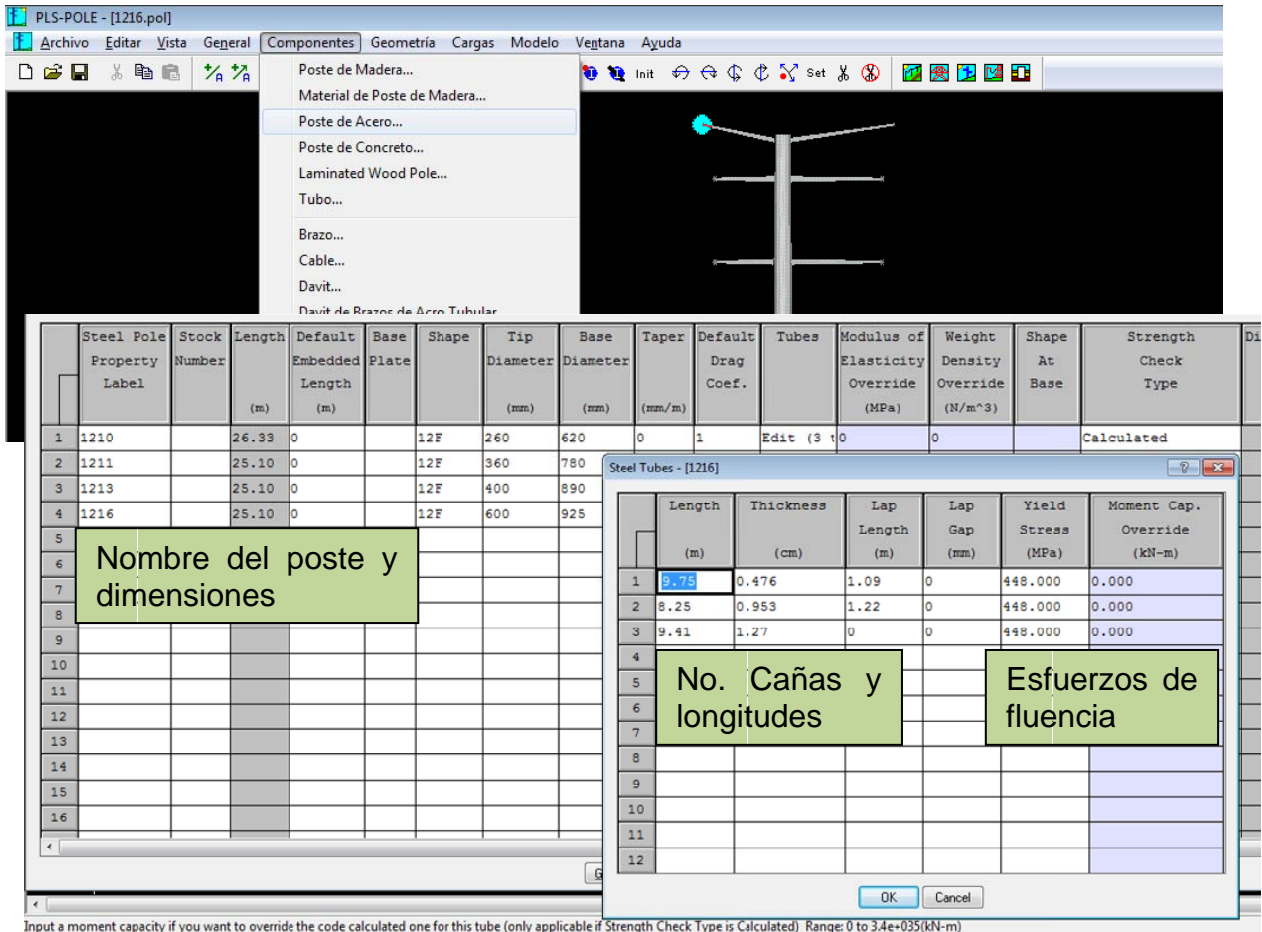


Figura 2.6.- Entrada del menú datos generales

Fuente: Propia

Se realiza la captura de las características del poste troncocónico en la caña, diámetros, longitudes, resistencia del acero estructural, etc. Esta información se captura como base de datos para futuros proyectos:



Input a moment capacity if you want to override the code calculated one for this tube (only applicable if Strength Check Type is Calculated). Range: 0 to 3.4e+035(kN-m)

Especificaciones de Acero ASTM (AISC)		
Material ASTM	Esfuerzo mínimo de fluencia ksi	Esfuerzo último, a tensión ksi
A-36	32	58-80
	38	58-80
A572	Gr 50	85
	Gr 60	75
	Gr 65	80

Figura 2.7.- Entrada del menú para captura de las bases de datos del acero estructural en la caña del poste

Fuente: Propia

Captura de las características de los brazos para la sujeción de cables conductores y de guarda, definiendo espesores, diámetros, geometría, resistencia del acero a utilizar, etc. Ídem al paso anterior se genera una base de datos para brazos:

The screenshot shows the PLS-POLE software interface. The 'Componentes' menu is open, highlighting 'Brazo...'. The main window displays a 3D model of a utility pole with arms. Below the software interface, a data entry table is shown with two sections: 'Brazos' and 'Intermediate Joints - [Gdader1216]'. A green box highlights the 'Brazos' table with the text 'Nombre y propiedades de los brazos', and another green box highlights the 'Intermediate Joints' table with the text 'Geometría de los brazos'.

	Davit Property Label	Stock Number	Steel Shape	Thickness (mm)	Base Diameter or Depth (mm)	Tip Diameter or Depth (mm)	Taper (mm/m)	Drag Coef.	Modulus of Elasticity (MPa)	Geometry	Strength Check Type	Vertical Capacity (N)	Tension Capacity (N)	Compres. Capacity (N)	Long. Capacity (N)	Yield Stress (MPa)
1	Gdader 1216	1216	6F	4.76	175	80	0	1	199948	Edit (1)	Calculated	NA	NA	NA	NA	448
2	Gdaizq 1216	1216	6F	4.76	175	80	0	1	199948							
3	Cndder 1216	1216	6F	6.35	220	100	0	1	199948							
4	Cndizq 1216	1216	6F	6.35	220	100	0	1	199948							
5																
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																
13																
14																
15																
16																
17																

	Joint Label	Horz. Offset (m)	Vert. Offset (m)
1	gdadert	4	-0.603
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Figura 2.8.- Entrada del menú para captura de las bases de datos de los brazos del poste  
Fuente: Propia

Captura de las características del aislamiento a utilizar, para la garantizar las distancias eléctricas fase – tierra, así como la sujeción de los cables de guarda:

Enter any notes regarding the source of this data, last revision, strength or design area factors included etc

	Etiqueta	Número de Stock	Longitud (m)	Peso (N)	Área de Viento (m <sup>2</sup> )	Capacidad de Tensión (N)	Longitud de Energización (m)	Diámetro de Energización (m)
1	115 kV		1.5	300	2.5	111000	0	0
2								
3								

Características de las cadenas de aisladores

	Etiqueta	Número de Stock	de Torque (N)
1	GDA		111000
2			
3			

Capacidad del herraje para cable de guarda

Figura 2.9.- Entrada del menú para captura de las bases de datos del aislamiento del poste

Fuente: Propia

De la base de datos generada para cañas del poste se define el tipo, distancias para enganches de los brazos, así como el tipo de apoyo en la base:

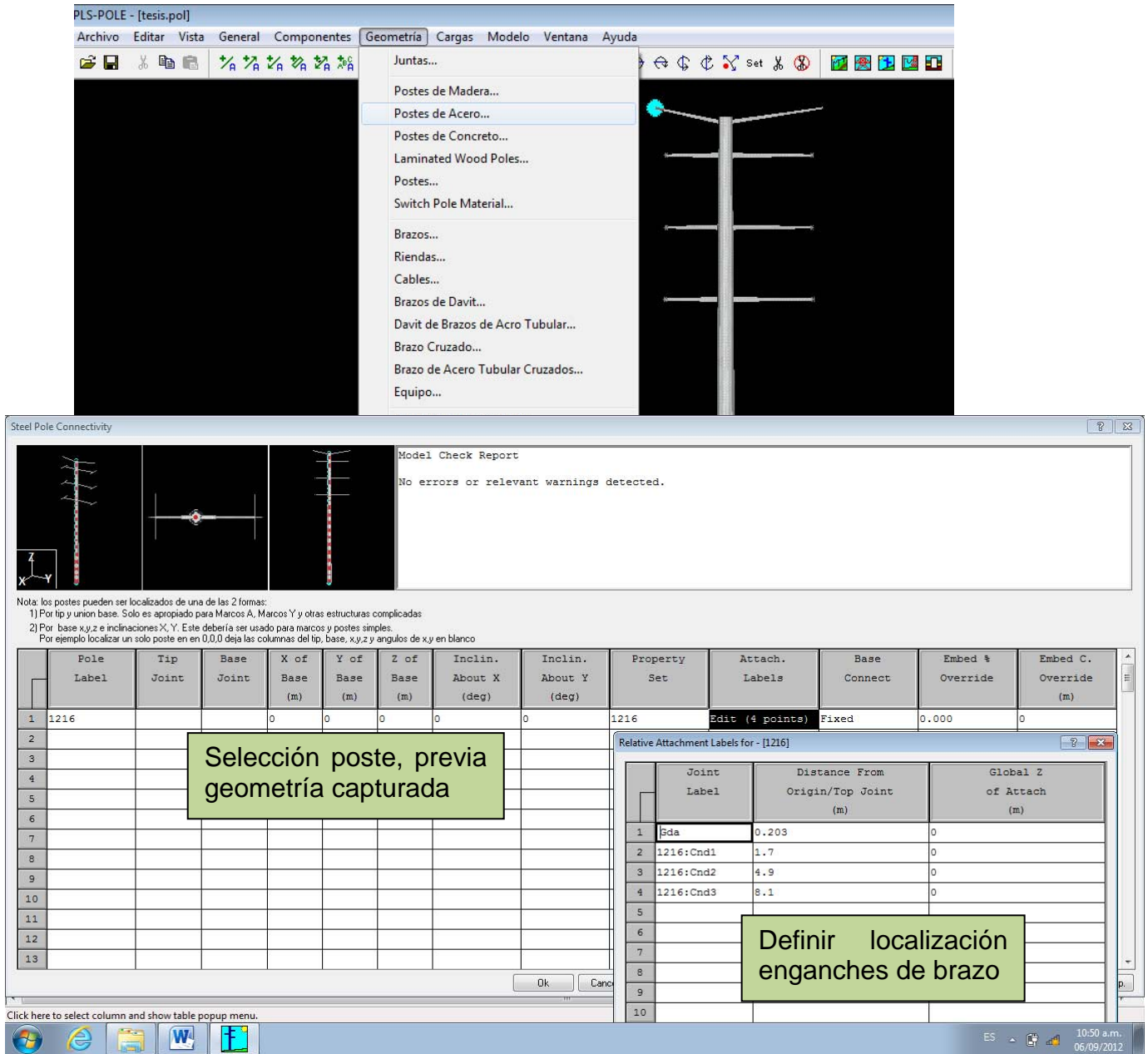


Figura 2.10.- Entrada del menú para definir la geometría de la caña del poste  
 Fuente: Propia



Se asigna nombre y se define la orientación de los brazos previamente capturados y posteriormente colocar los enganches del aislamiento:

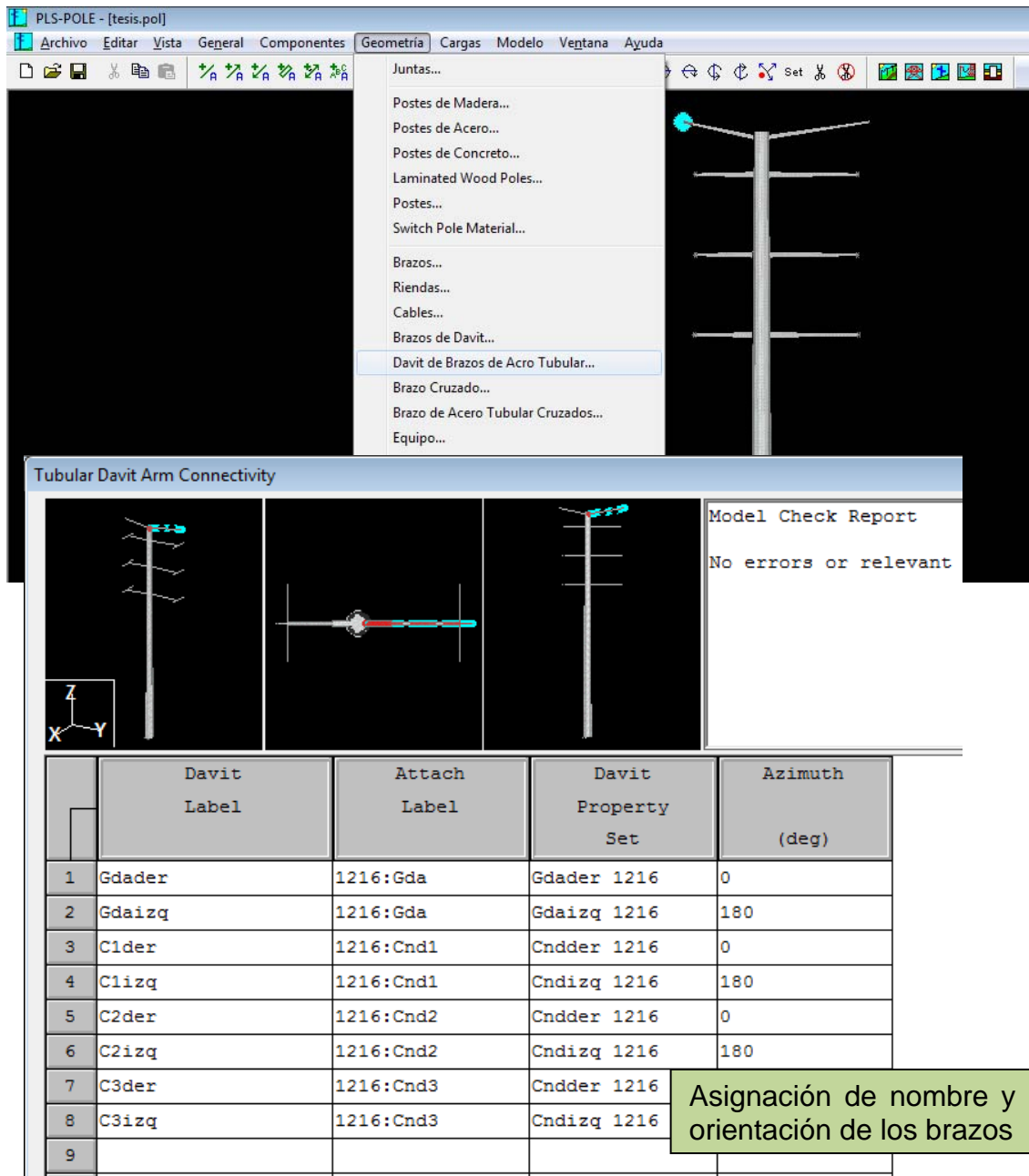


Figura 2.11.- Entrada del menú para definir la geometría de los brazos del poste

Fuente: Propia

Se define la ubicación del aislamiento en los brazos, para la correcta localización de los cables conductores y guarda, y poder definir las cargas que transmitirá el poste a la cimentación.

The screenshot shows the PLS-POLE software interface. The 'Geometría' menu is open, displaying options for poles, arms, cables, and insulators. Below the menu, the 'Strain Insulator Connectivity' dialog box is visible, featuring three preview windows and a table of connectivity data. A green callout box points to the 'Conectividad del aislamiento con el poste' column in the table.

	Strain Label	Structure Attach	Tip Label	Property Set	Azimuth (deg)	Min. Required Vertical Load (uplift) (N)
1	C1derad	C1der:cnddert	c1dad	115 kV	90	Conectividad del aislamiento con el poste
2	C1derat	C1der:cnddert	c1dat	115 kV	270	
3	C1izqad	C1izq:cnvizqt	c1iad	115 kV	90	
4	C1izgat	C1izq:cnvizqt	c1iat	115 kV	270	
5	C2derad	C2der:cnddert	c2dad	115 kV	90	No Limit
6	C2derat	C2der:cnddert	c2dat	115 kV	270	
7	C2izqad	C2izq:cnvizqt	c2iad	115 kV	90	
8	C2izgat	C2izq:cnvizqt	c2iat	115 kV	270	
9	C3derad	C3der:cnddert	c3dad	115 kV	90	

Figura 2.12.- Entrada del menú para definir la geometría del aislamiento del poste

Fuente: Propia

Asignación de vectores de carga previamente definidos, en base a la transmisión de esfuerzos debido a: Cables conductores, acción del viento en postes y cables, peso de herrajes, cargas por mantenimiento etc.

The screenshot shows the PLS-POLE software interface. The 'Cargas' menu is open, showing options: 'Cargas de Vector...', 'Cargas de Cable...', and 'Cargas de EIA...'. The main window displays a 3D model of a utility pole with cross-arms. Below the model, the 'Vector Load Cases' table is visible, with a green box highlighting the 'Factores de seguridad de' column. The table has columns for 'Load Case Description', 'Dead Load Factor', 'Wind Area Factor', 'SF for Steel Poles and Towers', 'SF for Wood Poles', 'Conc. Ult.', 'Conc. First Crack', 'Conc. Zero Tens.', 'Guys and Tubular Cables', 'Run Tubular Arms', 'Struts', 'Insuls.', 'SF for Found.', 'Point Loads', 'Wind/Ice Model', 'Trans. Wind Pressure (Pa)', 'Longit. Wind Pressure (Pa)', and 'I'. The table contains four rows of load cases. A green box highlights the 'Caso de carga' column. To the right, the 'Point Loads' table is shown, with a green box highlighting 'Presiones de viento sobre el poste'. The 'Point Loads' table has columns for 'Joint Label', 'Vertical Load (N)', 'Transverse Load (N)', and 'Longitudinal Load (N)'. It contains six rows of data. A green box highlights 'Asignación del árbol de cargas' pointing to the 'Point Loads' table.

Load Case Description	Dead Load Factor	Wind Area Factor	SF for Steel Poles and Towers	SF for Wood Poles	Conc. Ult.	Conc. First Crack	Conc. Zero Tens.	Guys and Tubular Cables	Run Tubular Arms	Struts	Insuls.	SF for Found.	Point Loads	Wind/Ice Model	Trans. Wind Pressure (Pa)	Longit. Wind Pressure (Pa)	I
2 Máxima sin hielo	1.26	1	0.95	0	0	0	0	0.95	0.95	0.95	0.95	0	Edit (14)	Wind on Face	0	0	0.0
3 Maniobra y mantenimiento	1.26	1	0.95	0	0	0	0	0.95	0.95	0.95	0.95	0	Edit (14)	Wind on Face	755	0	0.0
4 máxima con hielo	1.26	1	0.95	0	0	0	0	0.95	0.95	0.95	0.95	0	Edit (14)	Wind on Face	110	0	0.0

Joint Label	Vertical Load (N)	Transverse Load (N)	Longitudinal Load (N)
Gdader:gdadert	890	1950	0
Gdaiqz:gdaizqt	890	1950	0
3 cudad	4150	6250	0
4 cidat	4150	6250	0
5 ciad	4150	6250	0
6 ciat	4150	6250	0

Figura 2.13.- Entrada del menú para definir las cargas que se aplicarán al poste

Fuente: Propia

Verificado y ejecución del software con todas las variables asignadas:

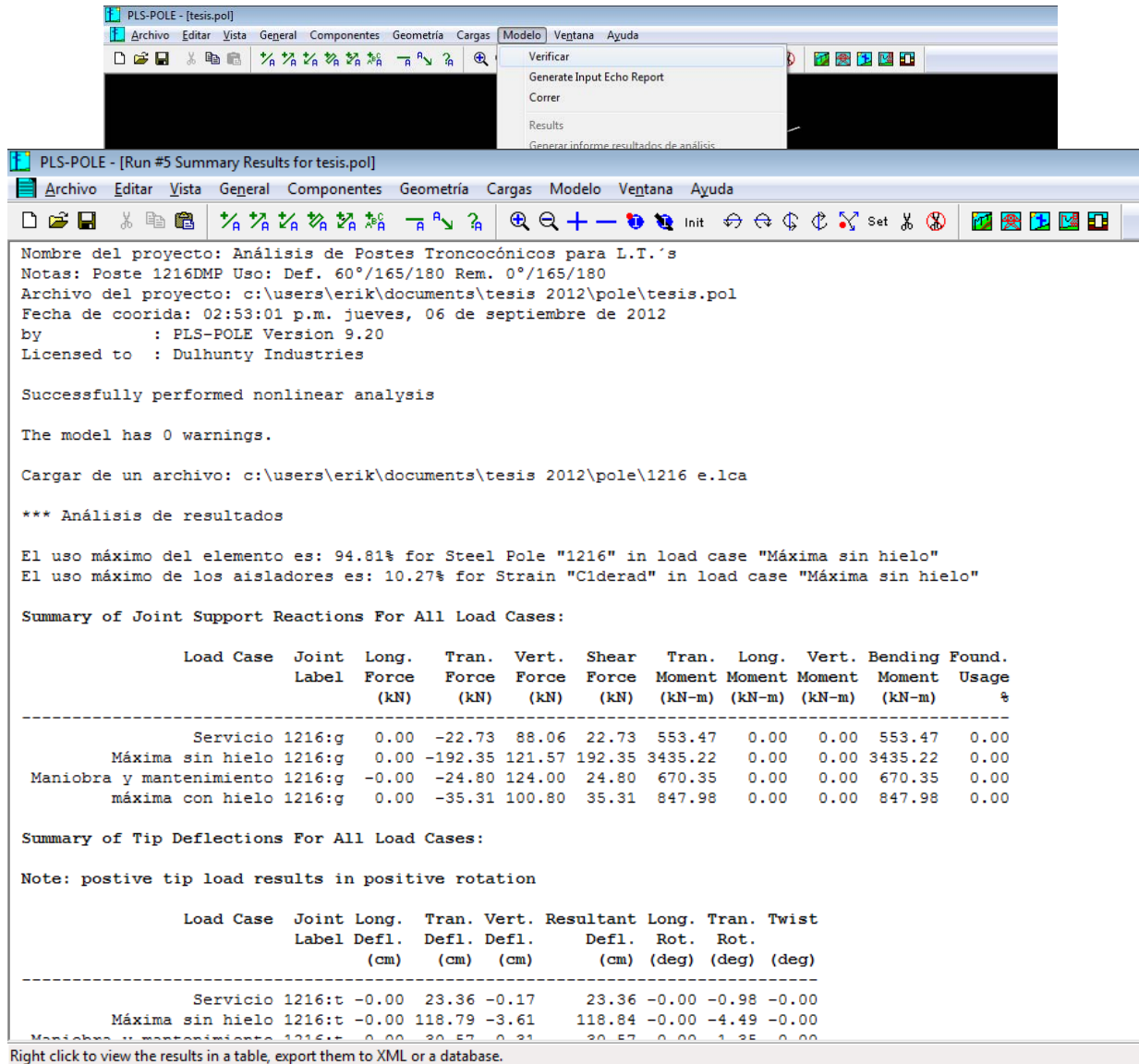
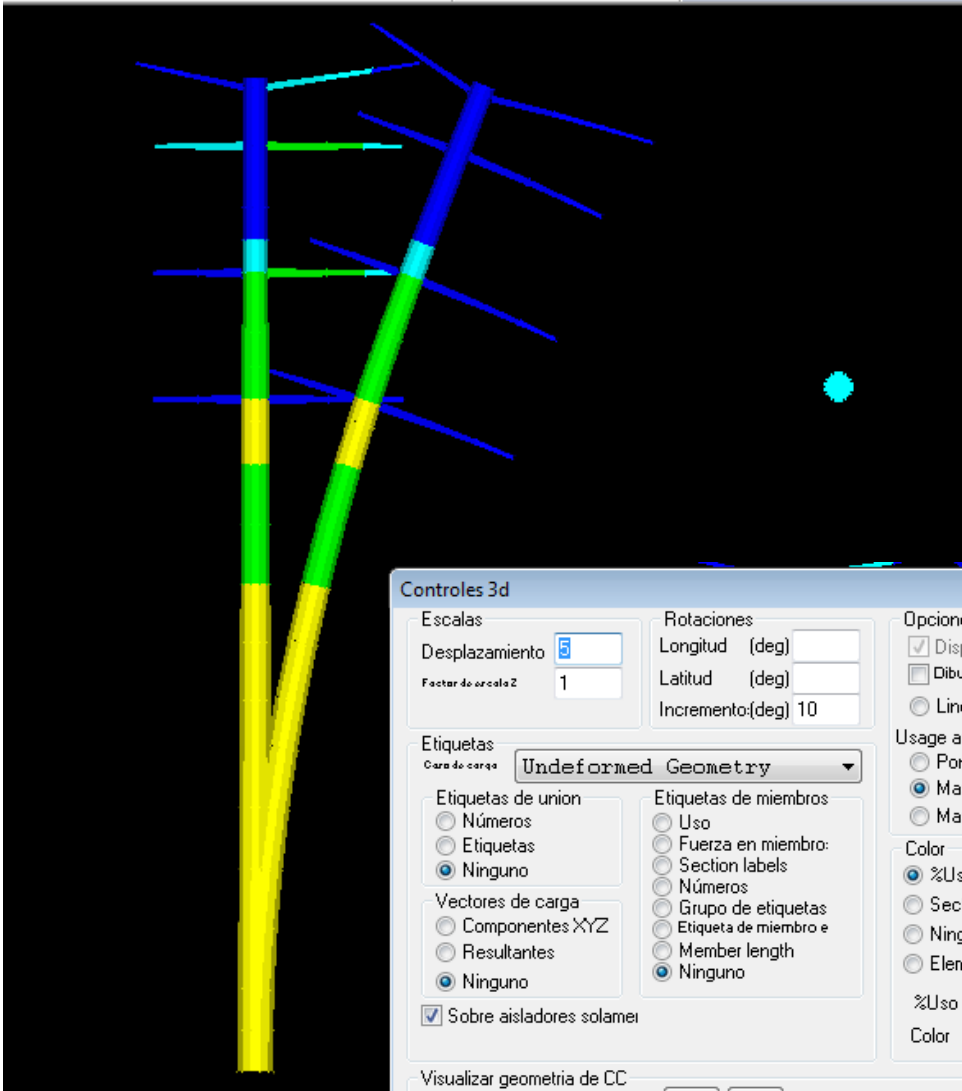


Figura 2.14.- Entrada del menú para ejecutar el análisis.

Fuente: Propia

Datos de salida del software, donde se observa el porcentaje de uso máximo del poste, reacciones para el diseño de la cimentación, vista de la geometría deformada del poste, entre otros valores.

**Vista deformada del Poste:**



El software da preferencias para definir vistas personalizadas, en escala de deformación, uso del poste (porcentaje), vectores de carga, etc.

Nota: Escala de deformación amplificada

Controles 3d

Escalas  
 Desplazamiento: 5  
 Factor de escala 2: 1

Rotaciones  
 Longitud (deg):  
 Latitud (deg):  
 Incremento(deg): 10

Opciones  
 Display fictitious members  
 Dibuja círculos de ur  
 Línea  Marco de cat  Dar volum

Usage and force for undeformed shape  
 Poner a cero  
 Max member usage or force for all L.C.  
 Max group usage or force for all L.C.

Color  
 %Uso  Cara  
 Section  Tensión/Comp.  
 Ninguno  Material Type  
 Element Type  Group Type

%Uso > 25 50 75 100  
 Color: [Blue] [Cyan] [Green] [Yellow] [Red]

Etiquetas  
 Cara de carga: Undeformed Geometry

Etiquetas de union  
 Números  
 Etiquetas  
 Ninguno

Etiquetas de miembros  
 Uso  
 Fuerza en miembro:  
 Section labels  
 Números  
 Grupo de etiquetas  
 Etiqueta de miembro e  
 Member length  
 Ninguno

Vectores de carga  
 Componentes XYZ  
 Resultantes  
 Ninguno

Sobre aisladores solamei

Visualizar geometría de CC

95%	Undeformed Geometry
24%	1 Servicio
95%	2 Máxima sin hielo
51%	3 Maniobra y mantenimiento
37%	4 máxima con hielo

Figura 2.15.- Vista de la deformada del poste y controles de visualización

Fuente: Propia

## **Interpretación de resultados:**

Derivado del análisis estructural se desprenden varias conclusiones:

1. Se observa la caña más esforzada y su porcentaje de uso
2. Se obtiene la condición más crítica de los elementos mecánicos, (para el cálculo de las cimentaciones).
  - Carga axial.
  - Fuerza cortante y
  - Momento de volteo.
3. Deformación máxima en la verticalidad del poste.
4. La dirección del viento que causa el mayor efecto a la estructura.
5. Así también se pueden observar otros fenómenos como son:
  - Tiros en alto.
  - Estructuras con tensiones desbalanceadas.

Lo cual permite analizar con especial cuidado para mantener la confiabilidad de la estructura durante vida útil de la línea de transmisión.

### **2.7. Diseño de la cimentación a base de pila recta.**

Se desarrolla a continuación el procedimiento general diseño de cimentación basada en pilas rectas de concreto reforzado, perforada y colada en sitio.

### **2.7.1. Revisión ante capacidad de carga lateral.**

Para el diseño de la pila se realizará basado por el método de la capacidad de carga lateral, mediante la Teoría de BROMS con el software de computadora CAISSON el cual realiza el dimensionamiento de la pila, cuyo principio se describe a continuación.

#### **Método de Broms:**

Este método se basa en el criterio de falla de los estratos del suelo. Las características del suelo se pueden obtener de forma razonable y el modelo de falla de una capa puede confirmarse mediante pruebas de laboratorio completamente a escala.

Este método dentro de sus simplificaciones supone que el suelo es homogéneo e isótropo, que la cimentación se deforma como un cuerpo rígido, considera la fuerza vertical muy pequeña comparada con la fuerza cortante y el momento flexionante, y para cargas últimas no se presentará la falla de la pila, pero sí la falla del suelo cuando su resistencia es excedida.

De acuerdo a la teoría de Broms, la pila sometida a una carga horizontal, tiende a girar sobre un punto neutro. El suelo circundante es el que contrarresta el efecto, con la idealización de la distribución de esfuerzos descrita en la figura 1, tanto para suelos friccionantes como para suelos cohesivos.

- 1.- Para Condición no Drenada:  $\rho = 9 C_u D$  y  $Q_{RH} = \rho * (L - 1.5 D)$
- 2.- Para Condición Drenada:  $\rho = 3 \bar{\gamma}_s L D K_p$  y  $Q_{RH} = \rho * (L / 2)$

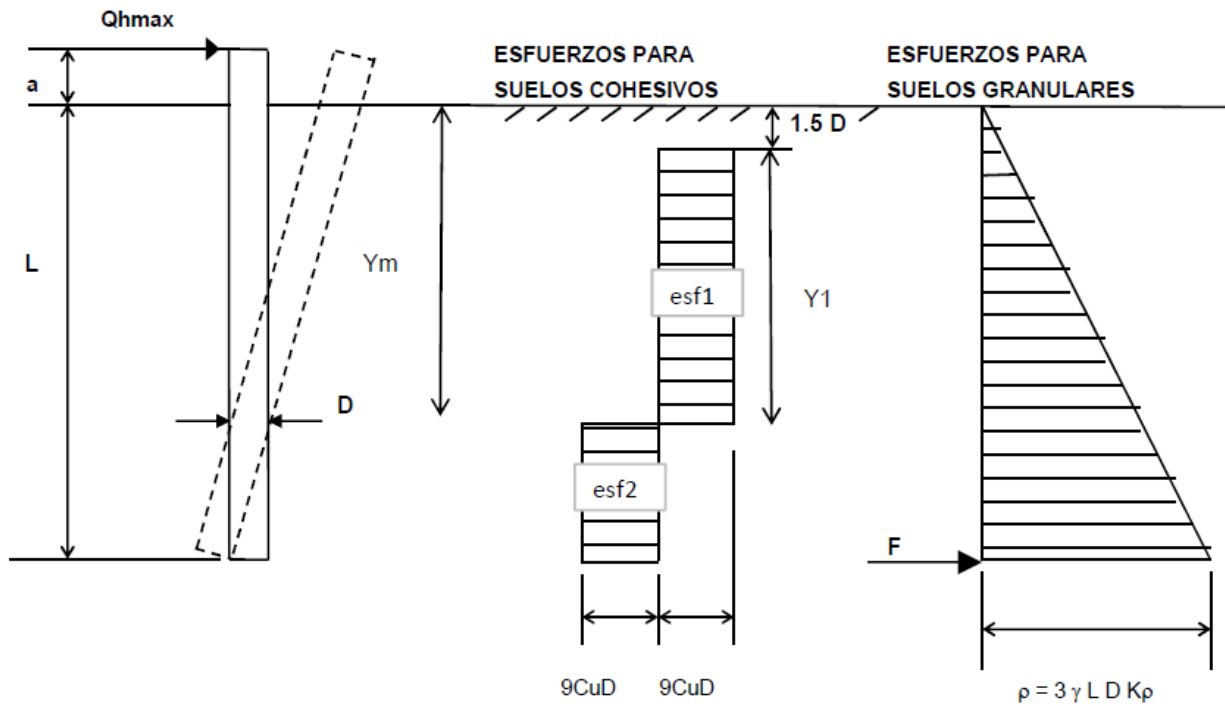


Figura 2.16.- Idealización de estratos de la capacidad de carga lateral  
Fuente: Software Caisson

Donde:

- D Ancho de la pila, m.
- $C_u$  Cohesión del suelo,  $kg/m^2$ .
- $\gamma_s$  Peso específico del suelo,  $kg/m^3$ .
- L Longitud enterrada de la pila, m.
- $k_p$  Coeficiente de empuje pasivo, adimensional;  $k_p = \tan^2(45 + \phi/2)$ .
- $Y_m$  Distancia del nivel de terreno natural al punto de rotación de la pila, m.
- $Q_{hmax}$  Carga horizontal máxima aplicada en la parte superior de la pila, kg.
- $Q_{RH}$  Resistencia horizontal última del suelo, kg.
- a Altura sobresaliente de la pila por encima del terreno, no menor de 1.0 m.



- $\phi$  Ángulo de fricción interna del suelo.
- M Momento flexionante aplicado en la parte superior de la pila,  $\text{kg/m}^2$ .
- $\rho$  Esfuerzo resistente por estrato identificado,  $\text{kg/m}^2$ .

Se puede decir que la teoría de los estratos (Broms) considera un modelo del suelo con un sistema de estratos para su estudio y que la falla en la cimentación será resultado de un conjunto de desplazamientos del suelo alrededor de la misma.

La pila con las cargas más desfavorables debe cumplir con la siguiente desigualdad:

$$Q_{hmax} < Q_{RH} * FR$$

Donde:

FR Factor de reducción de resistencia del suelo, parámetro emitido por la especificación CFE JA100-64 “Cimentaciones para Estructuras de L.T.´s”.

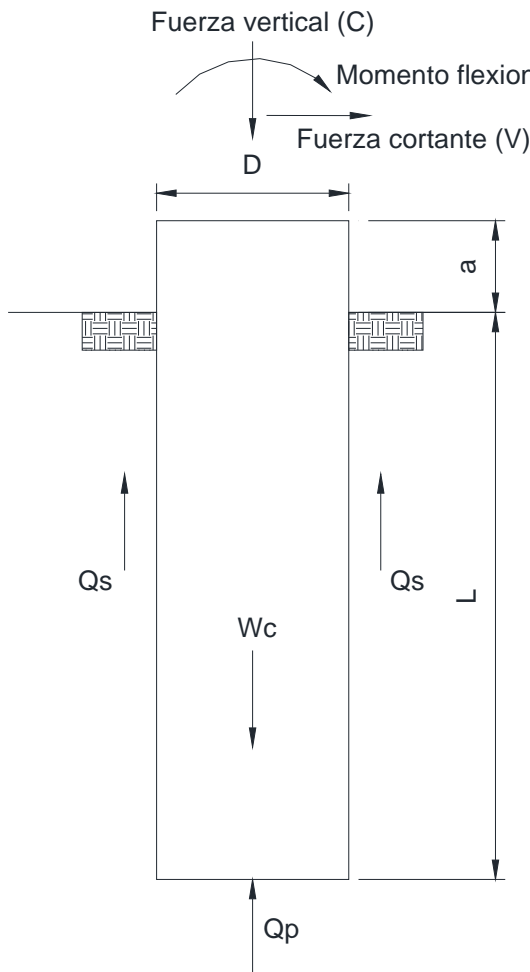
FR= 0.70	Cuando los parámetros de diseño del material sean obtenidos utilizando pruebas puntuales del sitio de cimentación mediante ensayos triaxiales
FR= 0.50	Cuando la resistencia del material se obtenga de correlaciones con pruebas de campo y éstas se hayan verificado con pruebas de laboratorio con materiales del sitio determinando propiedades mecánicas
FR= 0.35	Cuando la resistencia del material se obtenga de correlaciones con pruebas de campo

Tabla 2.1. Factores de Reducción de Resistencia del suelo

Fuente: Especificación CFE JA100-64

## 2.7.2. Revisión de los esfuerzos a compresión.

Los esfuerzos que transmite una pila al suelo, producidos por las cargas que soportan, generan fuerzas resistentes en el suelo en contacto con el fuste y por debajo de la base (ver figura).



Debe cumplirse la siguiente desigualdad que especifica la norma de CFE JA100-64 "Cimentaciones para estructuras de Líneas de Transmisión" en el apartado de Cimentaciones profundas, Capacidad de carga, Revisión a Compresión:

$$Q_{\max} FC < R$$

Figura 2.17.- Cargas que transmite la cimentación y reacciones del suelo

Fuente: Propia

Donde :

- R  $Q_p \cdot FR + \sum Q_{si} \cdot FR_i$  Capacidad de carga resistente del elemento, kg.
- $Q_{max}$   $C + W_c$  Carga actuante máxima aplicada en la cabeza de la pila, kg.
- FC Factor de carga que aplica la norma de CFE( 1.1 ), adimensional.
- $Q_p$  Capacidad de carga por punta, kg.
- $\sum Q_s$  Sumatoria de la Capacidad de carga por fricción de cada estrato, kg.
- $i$  Estrato de referencia.
- FR Factor de reducción de resistencia, adimensional.

Capacidad de carga por punta:

$$Q_p = q_{ult} \cdot A_b$$

Donde:

- $q_{ult}$  Capacidad de carga última del terreno, kg/m<sup>2</sup>.
- $A_b$  Área de la Base de la pila, m<sup>2</sup>.

Capacidad de carga por fricción de la pila:

Para pilas en suelos cohesivos

$$Q_s = \pi * D \sum_0^L \alpha * C_u * \delta L$$

Donde:

- $\alpha$  Factor de reducción de resistencia a la cohesión, adimensional.
- $C_u$  Cohesión del estrato, kg/m<sup>2</sup>.

D Diámetro de la pila en la base, m.

$\delta L$  Espesor del estrato, m.

Para pilas en suelos friccionantes

$$Q_s = \pi * D \sum_0^L P'_{hm} * \tan \phi * \delta L$$

Donde:

D Diámetro de la pila, m.

$P'_{hm}$  Presión vertical efectiva media a lo largo de la pila,  $\text{kg/m}^2$ .

$\phi$  Ángulo de fricción interna, grados.

$\delta L$  Espesor del estrato, m.

La capacidad última se logra sumando la carga tomada en la punta de la pila más la resistencia total por fricción generada en la interfaz suelo – pila, y afectados por sus factores correspondientes, obtenemos la ecuación siguiente:

$$R = Q_p * F_R + Q_s * F_R$$

Carga máxima sobre el terreno:

$$Q_{\max} = (C + W_c) * 1.1$$

Donde:

C Carga última de compresión sobre la pila, kg.

$W_c$  Peso de la cimentación, kg.

FC Factor de carga (1.1), adimensional.

Wc  $V_c \cdot \gamma_c \cdot V_c =$  volumen de la cimentación, m<sup>3</sup>.

$\gamma_c$  Peso volumétrico del concreto, kg/m<sup>3</sup>.

Volumen del concreto

$$V_c = \left( \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \right) \cdot (L + a)$$

### 2.7.3. Criterio para el cálculo de asentamientos.

De conformidad con la especificación JA100-64 los asentamientos se deben calcular a partir de las condiciones más desfavorables de carga para los Postes troncocónicos emitidos en la Especificación J6100-54 "Postes metálicos para Líneas de Transmisión y Subtransmisión", los cuales no deben de sobrepasar los estados límites de servicio siguientes:

- Los asentamientos totales simultáneos serán menores a 5.0 cm.
- Los asentamientos diferenciales entre Pilas, serán menores a 2.0 cm.

Dentro de la mecánica de suelos, y de acuerdo a los criterios establecidos para cada tipo de suelo, su naturaleza y sus propiedades, se han determinado algunos valores de acuerdo a las dimensiones (sección) de las cimentaciones a base de pilas.

El asentamiento simultaneo se evalúa de acuerdo a:

$$p_i = \frac{0.36 \cdot Q_{\max} \cdot D}{10 \cdot A \cdot E_u}$$

Donde:

$E_u$  Valor medio del módulo de deformación lineal en kg/cm<sup>2</sup>

$A$  Área de la sección transversal

$D$  Ancho de la cimentación.

$Q_{max}$  Carga transferida por la pila.

#### **2.7.4. Diseño estructural de la pila.**

##### **Refuerzo longitudinal**

Las pilas se diseñaran para los efectos de flexo compresión inducidas por las cargas a las cuales está sometido el poste. si  $P_u$  es menor que  $0.10 * f'_c * A_g$  se considerará una sección en flexión.

Donde:

$P_u$  Carga axial factorizada, kg.

$A_g$  Área total de la sección, cm<sup>2</sup>.

Si se cumple se colocará el área de acero de refuerzo longitudinal para columnas, no menor de:

$$A_{smin} = 0.01 * A_g \quad \text{De acuerdo con el ACI 318-08 "10.9"}$$

Ni mayor a:

$$A_{smax} = 0.08 * A_g$$

Si la Carga axial de diseño  $P_u$  sobrepasa los valores dados de  $0.10 * f'c * A_g$  ó  $f * P_b$  se considerará el diseño para elemento con cargas axiales lo que implicaría diseñar como columna de concreto reforzado.

El cálculo del refuerzo principal, se realizara mediante el criterio ACI-318 08 considerando la pila como una COLUMNA CIRCULAR, mediante el programa SPCOLUMN Versión 4.20.

### Revisión por cortante de la Pila.

Para la revisión de la pila por cortante se debe cumplir que el cortante resistente  $V_n$  multiplicado por un factor de reducción  $\phi$ , deberá ser mayor o igual que el cortante último actuante en la sección transversal de la pila.

$$\phi V_n \geq V_u$$

Donde:

$V_u$  Cortante último en la cabeza de la pila, kg.

$V_n$   $V_c + V_s$  Resistencia al cortante del concreto + el acero transversal.

$\Phi = 0.75$  Factor de reducción de resistencia del concreto al cortante.

Si  $\phi V_n > V_{u\max}$  Se acepta la sección de la pila

$$V_c = 0.53 \sqrt{f'c} * D * d \quad V_s = \left[ \frac{A_v * f_y * d}{s} \right] \leq 1.1 * \sqrt{f'c} * D * d$$

Donde:

- D Diámetro de la pila, cm.
- A Área de acero de refuerzo por cortante, cm.
- $f_y$  Esfuerzo del acero, kg/cm<sup>2</sup>.
- $f'_c$  Resistencia del concreto, kg/cm<sup>2</sup>.
- $\phi$  Factor de reducción de resistencia (0.7), adimensional.
- d Peralte efectivo, cm.
- s Separación del armado transversal, cm.

El acero de refuerzo transversal de la pila se calcula con la fuerza cortante máxima y para un refuerzo estribo individual o en espiral, donde la distancia de paso se calcula con los criterios descritos en el ACI-318.

Área del refuerzo mínimo a cortante para estribos individuales:

$$A_v = 3.5 \frac{d * s}{f_y} = \text{Despejando la separación} \quad s = \frac{A_z * f_y}{3.5 * d}$$

Cálculo de la distancia de paso en espirales:

$$s = \frac{4 * A_z}{\rho_{req} [D - (2r + \phi_{est})]} \quad \rho_{req} = \frac{0.45 [(D/2 - 2r)^2 - 1] * f'_c}{f_y}$$



Donde:

$A_z$  Área del estribo,  $\text{cm}^2$ .

$P_{req}$  Porcentaje de acero de refuerzo.

$D$  Diámetro de la pila, cm.

$r$  Recubrimiento, cm.

$\emptyset_{est}$  Diámetro del estribo, cm.

Nota: el paso del espiral no debe ser mayor que 7.0 cm ni menor que el tamaño del agregado máximo, de acuerdo a lo establecido por el ACI-318.

## CAPÍTULO 3

### RESUMEN EJECUTIVO DE MACRO Y MICRO LOCALIZACIÓN

Dentro de este capítulo se presenta la ubicación del tramo de la L.T. Guadalajara II – Siderúrgica a modernizar, que se analizará en la presente investigación, así como el estado y municipio para el cual pertenece.

#### **3.1. Generalidades.**

La presente investigación contempla el análisis de la modernización de la Línea de Transmisión Guadalajara II – Siderúrgica en el tramo de la Av. López de Legazpi, el diseño de la presente tesis es realizado para describir la metodología de análisis que establece la CFE en base a normas y especificaciones incluidas dentro de su sistema de calidad.

Dentro del análisis de la modernización de la Línea de Transmisión Guadalajara II – Siderúrgica, en el tramo de la Av. López de Legazpi, se contempla el evaluación de los postes troncocónicos a instalar, así como, sus cimentaciones respectivas en función de la mecánica de suelos realizada para este fin.

Una de las variantes que podrá presentar el análisis de la modernización de la L.T., son los estudios de mecánica de suelos necesarios para determinar la capacidad de carga del terreno tanto a compresión como a fricción.

Otras variantes importantes son las características del cable conductor y de guarda, tensiones de jalado así como los claros y desniveles que se presenten entre las estructuras.

Entre otras variables fundamentales no predecibles, se tienen las condiciones climáticas, en particular la acción del viento, que juega un papel determinante en el análisis estructural.

### **3.2. Objetivo.**

El objetivo principal de la presente Tesis es analizar la modernización de la L.T. Guadalajara II – Siderúrgica en el tramo de la Av. López de Legazpi, utilizando la metodología que establece la CFE dentro de su sistema de calidad en base a normas y especificaciones para el análisis de postes troncocónicos y diseño de cimentaciones que cumplan con los lineamientos de seguridad y confiabilidad del sistema eléctrico nacional.

### **3.3. Resumen ejecutivo.**

El tramo dedicado a esta investigación se encuentra dentro del municipio de Guadalajara, Jalisco. El fin de la investigación es analizar la modernización del tramo de la L.T. Guadalajara II – Siderúrgica en la Av. López de Legazpi, con el propósito de desarrollar y cumplir los alcances del análisis estructural y diseño de cimentaciones para los postes troncocónicos que se instalarán, garantizando la confiabilidad del servicio eléctrico a los clientes finales de forma económica.

### 3.4. Macro y micro localización.

El tramo de la línea de transmisión a modernizar se encuentra localizada dentro del estado de Jalisco, el cual cuenta con una extensión territorial de 80,386 km<sup>2</sup> comprendidos 125 municipios, ocupando el 6° lugar en extensión territorial de la República Mexicana.



Imagen 3.1.- Localización del estado de Jalisco en la República Mexicana.  
(Macro localización)

Fuente: <http://es.wikipedia.org>

En particular para el tramo de la investigación que compete a este proyecto en el Municipio de Guadalajara, se encuentra ubicado dentro de las coordenadas 20°40'35" latitud norte y 103°20'32" latitud Oeste a una altitud de 1536 metros sobre el nivel del mar (msnm). Se muestra la micro localización.



Imagen 3.2.- Localización de Guadalajara en el estado de Jalisco

Fuente: <http://es.wikipedia.org>

El clima de la ciudad de Guadalajara se cataloga dentro de los subgéneros Subhúmedo con lluvias en verano y humedad media (ACw1). La primavera es la estación más seca y cálida, con vientos en febrero y marzo; las lluvias son entre mayo y octubre, presentándose tormentas con intensa actividad eléctrica y fuertes vientos.

Parámetros climáticos promedio de Guadalajara (1951-2010) <span style="float: right;">[ocultar]</span>													
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura máxima registrada (°C)	35.0	38.0	39.0	41.0	39.0	38.5	37.0	36.5	36.0	35.0	32.0	33.0	41.0
Temperatura diaria máxima (°C)	24.7	26.5	29.0	31.2	32.5	30.5	27.5	27.3	27.1	27.1	26.4	24.7	27.9
Temperatura diaria promedio (°C)	17.1	18.4	20.7	22.8	24.5	23.9	22.0	21.9	21.8	21.0	19.2	17.5	20.9
Temperatura diaria mínima (°C)	9.5	10.3	12.3	14.3	16.4	17.3	16.5	16.4	16.5	14.9	12.1	10.3	13.9
Temperatura mínima registrada (°C)	-1.5	0.0	1.0	0.0	1.0	10.0	9.0	11.0	10.0	8.0	3.0	-1.0	-1.5
Precipitación total (mm)	15.6	6.6	4.7	6.2	24.9	191.2	272.5	226.1	169.5	61.4	13.7	10.0	1002.4
Días de precipitaciones (≥ 0.1 mm)	2.1	1.2	0.7	1.1	3.5	15.2	21.6	20.0	15.5	6.4	1.8	1.8	90.9
Horas de sol	219.6	239.3	264.9	264.3	291.1	221.5	198.5	210.7	191.1	223.5	232.3	187.0	2743.8
Humedad (%)	54	48	45	40	43	61	72	73	73	67	60	60	58

Fuente N°1: Servicio Meteorológico Nacional <sup>21 22</sup>  
Fuente N°2: Colegio de Postgraduados (humedad y sol)<sup>23</sup>

Imagen 3.3.- Parámetros climáticos para Guadalajara, Jalisco.

Fuente: <http://es.wikipedia.org>



Imagen 3.4.- Localización de la trayectoria de la Línea de Transmisión a modernizar.

Fuente: <http://es.wikipedia.org>

### **3.5. Actividades de la región.**

Las actividades en la región de Guadalajara, está basada en los tres grandes rubros de la economía, Primario (Agricultura, Ganadería, etc.), Industrial y Turístico. Guadalajara es la capital industrial en el Occidente de México, Actualmente es conocida como “El Valle del Silicio” mexicano, debido al gran auge y desarrollo de la industria electrónica. En el municipio se pueden admirar gran cantidad de atractivos turísticos, lo cual atrae a muchos visitantes anualmente que representan un importante factor en el desarrollo económico.

### **3.6. Informe fotográfico.**

En las siguientes imágenes se puede observar las condiciones actuales en que se encuentra el tramo de la Línea de transmisión Guadalajara II – Siderúrgica, en específico en la avenida López de Legazpi, y la necesidad de que se lleve a cabo la modernización para garantizar la confiabilidad del suministro eléctrico.



Imagen 3.5.- Localización de la línea de transmisión tramo Av. López de Legazpi  
Fuente: Propia



Se observa el deterioro de los postes de madera debido a que han cumplido su pronóstico de vida útil.

Imagen 3.6.- Poste no. 34  
Fuente: Propia





Condiciones actuales de operación en los postes de madera a sustituir.

Imagen 3.7.- Poste no. 34

Se observa la deformación permanente en algunos de los postes de madera instalados.



Imagen 3.8.- Deflexión de postes de madera por desgaste natural

Fuente: Propia

## **CAPÍTULO 4**

### **METODOLOGÍA**

Dentro de este capítulo se indica el método y procedimientos que se emplearon para el análisis y la solución de la presente investigación, así como el alcance propuesto para la modernización de la L.T. Guadalajara II – Siderúrgica en el tramo de la Av. López de Legazpi, tiene un sustento en la ciencia y, por lo tanto, se puede considerar confiable.

También se menciona el enfoque cuantitativo, alcance de la investigación exploratorio y diseño no experimental, se analizan las herramientas o instrumentos de recopilación de datos, así mismo, de manera general se realiza una descripción del procedimiento de investigación que se llevó a cabo para la ejecución de este trabajo de investigación.

#### **4.1. Enfoque de la investigación.**

Este trabajo de investigación tiene un enfoque cuantitativo, ya que según Hernández (2010), se utiliza para responder preguntas de investigación y probar hipótesis por medio de la correlación y el análisis de datos basados en la medición numérica.

Este enfoque elige una idea que lleva a una pregunta de investigación o varias según sea el caso, lo que hace generar hipótesis y variables una vez establecida la idea, la o las preguntas de investigación, variables o hipótesis, se procede a generar un plan para probarlas, midiéndose las variables para proceder al análisis y finalmente llegar a las conclusiones que satisfagan los cuestionamientos.

## **4.2. Alcance de la investigación.**

En la presente investigación se tuvo un alcance exploratorio debido a que ha sido poco estudiado y existen muchas preguntas sin respuesta.

Los estudios exploratorios son aquellos que sirven para preparar los conocimientos sobre algo totalmente desconocido o si existe poca información sobre lo estudiado, en dicho estudio pocas veces constituye un fin en sí mismo y se caracteriza por ser más flexible en su metodología, es más amplio y disperso.

## **4.3. Diseño de la investigación.**

En el presente trabajo se utilizó investigación no experimental, esta investigación se clasifica en dos tipos: transeccional y longitudinal. La investigación longitudinal es aquella que se centra en estudiar cómo evolucionan las variables y analiza los cambios a través del tiempo de un evento, y la investigación transeccional de acuerdo con Hernández (2010), se analiza en un momento dado el fenómeno, esta última investigación experimental es la que se utilizó en la presente investigación.

### **4.3.1 Diseño transeccional.**

Como ya se mencionó, los diseños de investigación transeccional recolectan datos en un sólo momento, y su propósito es describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento específico. El diseño transeccional se clasifica en exploratorio, descriptivo y de correlación causal.

El diseño transeccional exploratorio es el que comienza a conocer un fenómeno, variable, evento o situación, y se aplica a investigaciones nuevas o poco conocidas, sirven para inmersiones iniciales en el evento o fenómeno que se quiere estudiar.

El diseño descriptivo es el que tiene como objetivo, indagar en la incidencia y valores donde intervienen una o más variables.

El diseño correlacional - causal, es el que describe relaciones entre dos o más categorías, conceptos o variables en un momento específico para proporcionar su descripción.

En la presente investigación se utilizó el diseño transeccional del tipo exploratorio porque su propósito fue comenzar a conocer una situación ya que el problema de investigación es poco conocido y relativamente nuevo.

#### **4.4. Instrumentos de recopilación de datos.**

Los instrumentos empleados para la recopilación de datos fueron la investigación documental porque se emplearon diversos libros e información sobre la construcción de estructuras para líneas de transmisión eléctrica, además de consultar las especificaciones emitidas por la CFE y los reglamentos de construcción de obra civil, que rigen para la República Mexicana.

Otro instrumento fue el software conocido como Excel de Microsoft Office para introducir los datos de cargas y características numéricas de construcción para diseño de cimentaciones, también se utilizó el software PLS POLE, utilizado para análisis

estructural de postes troncocónicos, el cual nos arroja resultados de elementos mecánicos en la base para diseño de las cimentaciones.

#### **4.5. Descripción del proceso de investigación.**

La investigación se inició con la recopilación del estado estructural en que se encuentran los postes de madera que serán reemplazados por postes troncocónicos de acero, debido a su desgaste natural se decidió cambiar por postes de mayor vida útil como base de la modernización de la Av. López de Legazpi, sus características físicas como dimensionales se describen dentro de los planos de diseño que forman parte de las estructuras normalizadas que estandariza la CFE para que sean aplicables en los proyectos de modernización y ampliación de la red eléctrica nacional.

Una vez obtenidos todos los datos de entrada, se iniciará con revisar estructuralmente los postes troncocónicos de acero galvanizado con ayuda del software PLS POLE, para determinar las reacciones que transmite al suelo y así analizar la cimentación a base de pilas rectas con ayuda de una hoja de cálculo de Excel.

Previamente se investigaron las propiedades del suelo por un Laboratorio especializado en mecánica de suelos, llevándose a cabo un Estudio Geotécnico en la zona en base a la especificación CFE C0000-43 “Estudios geotécnicos para estructuras de líneas de transmisión” donde se obtienen las características principales de los estratos como son: ángulo de fricción, cohesión, peso específico, capacidad de carga, clasificación Sucs, entre otros, datos necesarios para el diseño de la cimentación a base de pilas rectas.

El diseño de la cimentación se realiza siguiendo las recomendaciones de las normas y reglamentos que establece la CFE en su especificación CFE JA100-64 “Cimentaciones para estructuras de Líneas de Transmisión”. En la cual sobresalen las normas ACI 318 “Reglamento para las construcciones de concreto estructural”, IEEE 691 “Guía para el diseño y pruebas de cimentaciones de estructuras de transmisión”, y el “Manual de diseño de obras civiles de la CFE .- Diseño por viento”.

## **CAPÍTULO 5**

### **CÁLCULO, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

En este capítulo se realiza el análisis estructural de los postes troncocónicos de acero galvanizado que se instalarán en la Av. López de Legazpi, como parte de la modernización que se realiza en las instalaciones de CFE para garantizar la confiabilidad y continuidad del suministro eléctrico sustituyendo postes de madera que ha finalizado su vida útil.

#### **5.1.- Datos generales.**

La Línea de Transmisión Eléctrica Guadalajara II – Siderúrgica, construida en una Tensión nominal de 161 kV, con postes de madera y 25.3 kilómetros de longitud, instalados 2 circuitos con cable 477 ACSR/AS, y cables de guarda 7#8 AAS, localizada en el estado de Jalisco dentro de los Municipios de Guadalajara y Tlaquepaque, la cual forma parte del anillo de transmisión de la zona centro para abastecer a medianas y pequeñas empresas, fue construida en el año de 1988, se requiere de su modernización para garantizar el suministro eficiente de la energía eléctrica a la Metrópoli de Guadalajara, mediante la instalación de postes troncocónicos de acero galvanizado.

- **Características de la Línea aérea.**

- Tensión de la Línea 161 kV
- Número de circuitos 1 CTO.
- Número de conductores por fase 1 C/F
- Disposición de las fases Vertical
- Temperatura media 19.7°C
- Velocidad de viento máxima mapa de isotacas (periodo de retorno 50 años) 110 km/h
- Velocidad de viento reducido mapa de isotacas (periodo de retorno 10 años) 100 km/h
- Altitud (msnm) 1551 m

VELOCIDADES REGIONALES

Ciudad	Nº obs.	Longitud	Latitud	Tr10	Tr50	Tr200	Q5	Q15
Córdoba, Ver.		-96.56	18.53	138	159	174	181	192
Cozumel, Q. Roo	23005	-86.94	20.51	140	200	250	178	245
Cuatitlán Izcalli, Edo. Méx.		-99.12	19.38	100	110	121	130	140
Cuatitlán, Mor.		-98.57	18.48	105	119	130	138	143
Cuernavaca, Mor.	17726	-99.23	18.88	102	120	130	140	142
Culiacán, Sin.	25014	-107.40	24.82	90	107	120	127	137
Delicias, Chih.		-105.28	28.11	130	148	160	169	178
Durango, Dgo.	10017	-104.67	24.03	110	124	140	143	153
Ecatepec de Morelos, Edo. Méx.		-99.03	19.36	100	111	121	130	140
Ensenada, B. C.	2025	-116.53	31.85	86	105	120	125	135
Fresnillo, Zac.		-102.52	23.10	117	134	145	153	161
Gómez Palacio, Dgo.		-103.30	25.33	130	149	160	170	180
Guadalajara, Jal.	14065	-103.38	20.67	100	110	120	130	140

Tabla 5.1.- Tabla de velocidades de viento regionales de la República Mexicana  
Fuente: Manual de diseño por viento CFE



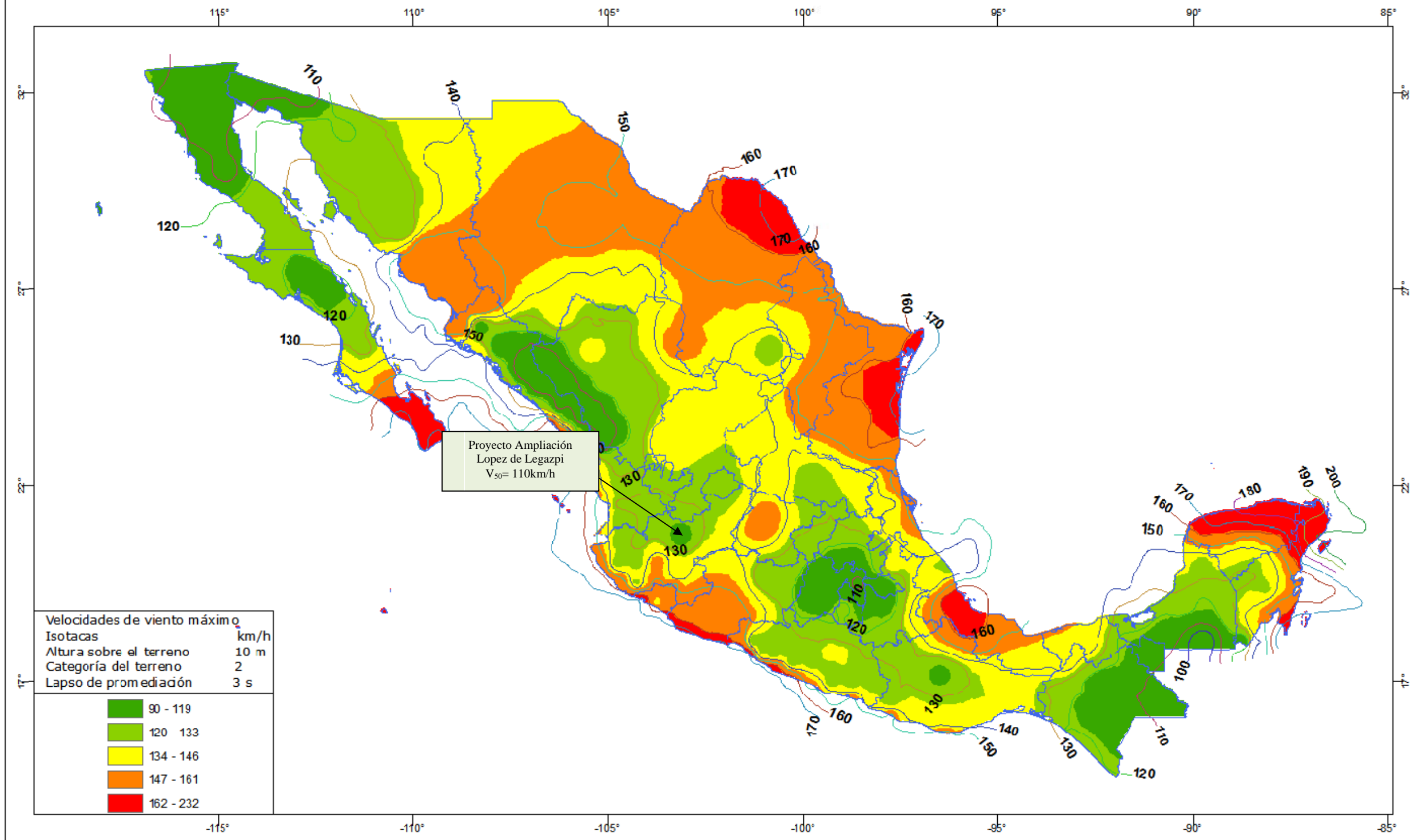


Figura 5.1.- Mapa de isotacas de la República Mexicana, periodo de retorno 50 Años  
Fuente: Manual de diseño por viento CFE

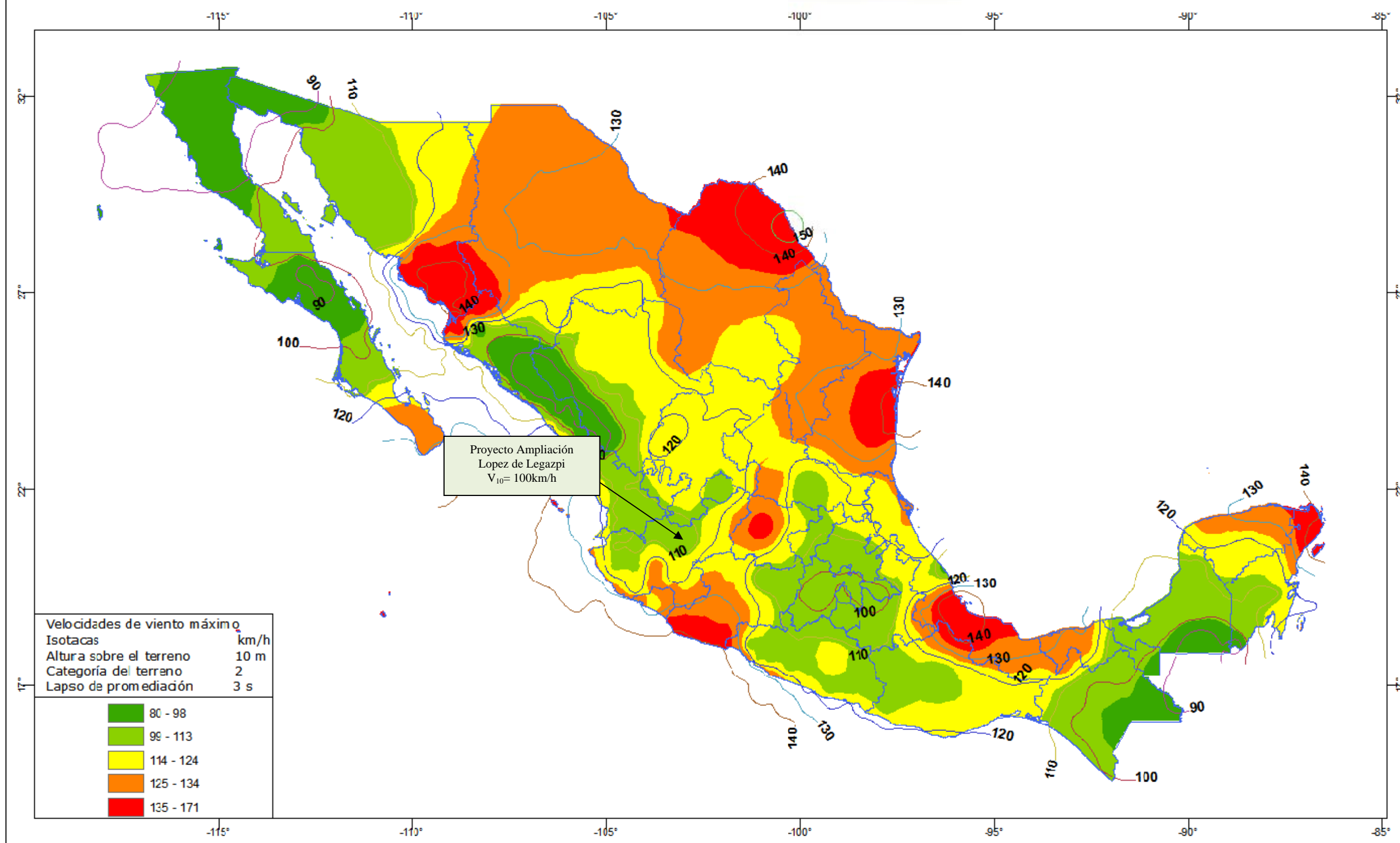


Figura 5.2.- Mapa de isotacas de la República Mexicana, periodo de retorno 10 Años

Fuente: Manual de diseño de viento CFE

Ciudad	Nº obs.	Longitud	Latitud	msnm	Temp. media anual (°C)
Cuautla, Mor.		-98.57	18.48	1303	22.5
Cuernavaca, Mor.	17726	-99.23	18.88	1560	22.3
Culiacán, Sin.	25014	-107.40	24.82	40	24.9
Delicias, Chih.		-105.28	28.11	1165	19.0
Durango, Dgo.	10017	-104.67	24.03	1885	17.2
Ecatepec de Morelos, Edo. Méx.		-99.03	19.36	2250	15.1
Ensenada, B. C.	2025	-116.53	31.85	20	16.1
Fresnillo, Zac.		-102.52	23.10	2195	17.1
Gómez Palacio, Dgo.		-103.30	25.33	1100	20.6
Guadalajara, Jal.	14065	-103.38	20.67	1551	19.7
Guadalupe, N. L.		-100.14	25.40	480	20.3
Guanajuato, Gto.	11024	-101.25	21.02	1999	18.6
Guaymas, Son.		-110.54	27.55	44	25.5
Hermosillo, Son.	26040	-110.97	29.07	200	24.6
Heroica Matamoros, Tamps.		-97.30	25.52	10	23.8
Heroica Nogales, Son.		-110.56	31.19	1181	17.6
Hidalgo del Parral, Chih.		-105.40	26.56	1781	17.6
Huajuapán de León, Oax.	20298	-97.78	17.83	1600	20.3
Huixquilucan, Edo. Méx.		-99.16	19.23	2732	13.7
Iguala de la Independencia, Gro.		-99.32	18.20	800	26.7
Irapuato, Gto.		-101.21	20.40	1724	19.7
Isla Socorro, Col.	6011	-110.95	18.72		26.1
Ixtapaluca, Edo. Méx.		-98.53	19.19	2260	14.3
Jalapa, Ver.	30075	-96.92	19.52	1427	19.8
Jiutepec, Mor.		-99.10	18.52	1350	24.9
La Paz, B. C. S.	3026	-110.29	24.17	16	23.3
Lagos de Moreno, Jal.	14083	-101.92	21.35	1900	18.2
Laguna Verde, Ver.	30201	-96.41	19.72	30	25.6
León de los Aldama, Gto.		-101.40	21.07	1818	19.6
Loreto, B. C. S.	3168	-111.35	26.02	10	23.8
Los Mochis, Sin.		-108.59	25.47	14	25.2
Los Reyes Acaquilpan, Edo. Méx.		-98.58	19.21	2248	16.3
Manzanillo, Col.	6018	-104.28	19.05	380	24.6
Mazatlán, Sin.	25062	-106.42	23.21	60	25.3
Mérida, Yuc.	31019	-89.65	20.98	22	26.5
Metepec, Edo. Méx.		-99.36	19.15	2620	12.0

Tabla 5.2 Ubicación, altitud y temperatura media anual de la República Mexicana

Fuente: Manual de diseño por viento CFE

El análisis de los postes troncocónicos, se realizará mediante un programa de cálculo elástico implementado en computadora (PLS - POLE). Este programa permite la resolución de sistemas hiperestáticos de múltiples incógnitas mediante planteo matricial del método de incógnitas geométricas, obteniendo los esfuerzos así como su porcentaje de trabajo ante las solicitaciones presentadas, dando como resultado la descarga de las solicitaciones de la estructura al suelo. Como parte de este estudio se realizará el análisis del poste tipo 1216 DMP.

- **Características de los postes troncocónicos 1216DMP:**

	Uso Normalizado	Uso de Proyecto
Uso	Deflexión/Remate	Remate
Ángulo max. de Deflexión	60°/0°	0°
Claro medio horizontal (m)	165/165	193
Claro vertical (m)	180/180	189
Tipo de cable max. Soportado	795 ACSR	477 ACSR

- **Características de los cables:**

*Cable de hilo de guarda 5/16 AG-9*

- Sección	46.00 mm <sup>2</sup>
- Diámetro	8.73 mm
- Peso	0.39 kg/m
- Resistencia a la Ruptura	3160kg
- Modulo de Elasticidad final	16200kg/mm <sup>2</sup> /100
- Coeficiente de Dilatación	13.0 x10 <sup>-6</sup> 1/°C

*Cable conductor 477 ACSR*

- Sección	281.10 mm <sup>2</sup>
- Diámetro	21.80 mm
- Peso	0.97 kg/m

- Resistencia a la Ruptura 8820kg
- Modulo de Elasticidad final 7648.6kg/mm<sup>2</sup>/100
- Coeficiente de Dilatación 18.82 x10<sup>-6</sup> 1/°C

## 5.2.Evaluación de las solicitaciones actuantes.

### *Cálculo de presiones de viento sobre estructura y cables.*

Para poder estimar las presiones de viento que actúan sobre la estructura, se aplicó el manual de Diseño por viento de la CFE y la Especificación J1000-50 “Torres para Líneas de Subtransmisión y Transmisión” con los siguientes parámetros de diseño.

Presión de viento sobre la estructura:

$$P_{ze} = F_{ge} * C_{ae} * q_z$$

Datos de entrada:

Velocidad de viento	$V_D = F_T F_{rz} V_R$
Factor de Topografía	$F_T = 0.9$
Factor de exp. del viento	$F_{\alpha} = 0.9545$
Velocidad regional T=50 años	$V_{R50} = 110 \text{ km/h}$
Velocidad regional T=10 años	$V_{R10} = 100 \text{ km/h}$
Velocidad de viento	$V_{D50} = 0.9 * 0.9545 * 110 = \mathbf{94.50 \text{ km/h}}$
	$V_{D10} = 0.9 * 0.9545 * 100 = \mathbf{85.91 \text{ km/h}}$
Viento reducido	$V_{Dred} = V_{D10} / 2 = \mathbf{42.95 \text{ km/h}}$

Presión dinámica de base (m):

$$q_z = 0.0048 * G * V_D^2$$

Altura sobre nivel del mar	msnm	= 1551 m
Temperatura ambiente	t	= 19.7° C
Factor de corrección por temperatura	G	= 0.8456

Presión dinámica de base:  $q_{z50} = 0.0048 * 0.8456 * 94.50^2 = \mathbf{36.25 \text{ kg/m}^2}$   
 $q_{zred} = 0.0048 * 0.8456 * 42.95^2 = \mathbf{7.49 \text{ kg/m}^2}$

Factor de respuesta dinámica (adimensional):

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

Altura de la estructura  $h = 25.10 \text{ m}$

Altura promedio en estructura (2/3h)  $h_o = 16.73 \text{ m}$

Factor de ráfaga 3 seg.  $g_{z3} = 1.844$

Factor de ráfaga 10 min.  $g_{z10} = 1.213$

Factor variación de potencia  $\alpha' = 0.216$

Escala de turbulencia  $L_s = 53.50$

Factor de rugosidad  $K = 0.0142$

Factor respuesta dinámica:  **$F_{ge} = 0.9803$**

Coeficiente de arrastre:  $C_{ae} = 1.2$

Presión de viento en la Estructura:

$$P_{ze} = F_{ge} * C_{ae} * q_z$$

$$P_{ze50} = 0.9803 * 1.2 * 36.25 = 42.63 \text{ kg/m}^2$$

$$P_{zered} = 0.9803 * 1.2 * 7.49 = 8.81 \text{ kg/m}^2$$

Presión de viento sobre los cables:

$$P_{zc} = 0.60 * F_{gc} * C_{ac} * q_z$$

Datos de entrada:

Velocidad de viento T=50 años:  **$V_{D50} = 94.50 \text{ km/h}$**

**$V_{Dred} = 42.95 \text{ km/h}$**

Presión dinámica de base:  **$q_{z50} = 36.25 \text{ kg/m}^2$**

**$q_{zred} = 7.49 \text{ kg/m}^2$**

Coeficiente de arrastre en cables:  $C_{ac} = 1.0$

Factor de respuesta dinámica (adimensional):

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

Altura de la estructura  $h = 25.10$  m

Altura promedio cables (2/3h)  $z = 16.73$  m

Factor de ráfaga 3 seg.  $g_{z3} = 1.844$

Factor de ráfaga 10 min.  $g_{z10} = 1.213$

Factor variación de potencia  $\alpha' = 0.216$

Claro entre apoyos de postes  $L = 193$  m

Escala de turbulencia  $L_s = 53.50$

Factor de rugosidad  $K = 0.0142$

Factor respuesta dinámica  $F_{ge} = 0.7341$

Presión de viento en los Cables:

$$P_{zc50} = 0.6 * 0.7341 * 1.0 * 36.25 = 15.96 \text{ kg/m}^2$$

$$P_{zcred} = 0.6 * 0.7341 * 1.0 * 7.49 = 3.29 \text{ kg/m}^2$$

### 5.3. Árboles de carga para poste troncocónico 1216 DMP.

Conforme a los requerimientos de la especificación “CFE J6100-54 Postes metálicos para Líneas de Transmisión y Subtransmisión”, establece que todas las suposiciones de cargas para análisis estructural de postes, se deben realizar conforme a la siguiente tabla:

<b>HIPOTESIS DE CARGA</b>	<b>COMBINACIÓN DE CARGA</b>	<b>DEFORM. PERMISIBLE</b>	<b>VIENTO</b>
Servicio (suspensión)	$(PC+PA+PE) * 1.0$	2%	-----
Servicio (deflexión)	$(PC+PA+PE+CT) * 1.0$	3%	-----
Servicio (remate)	$(PC+PA+PE+FL+CT) * 1.0$	3%	-----
Servicio (transición)	$(PC+PA+PE+FL+CT) * 1.0$	1%	
Máxima (Suspensión)	$(PC+PA+PE+VC+VE) * 1.16$	-----	VM
Máxima (deflexión)	$(PC+PA+PE+VC+VE+CT) * 1.26$	-----	VM
Máxima (remate)	$(PC+PA+PE+VC+VE+FL+CT) * 1.26$	-----	VM
Tendido y Mantenimiento	$(PC+PA+PE+PVM+FL+CT) * 1.0$	-----	-----

<b>COMBINACIONES DE CARGA CON HIELO</b>			
Máxima (Suspensión)	$(PCH+PA+PE+VCH+VEH) * 1.16$	-----	VR
Máxima (deflexión)	$(PCH+PA+PE+VCH+VEH+CT) * 1.26$	-----	VR
Máxima (remate)	$(PCH+PA+PE+VCH+VEH+FL+CT) * 1.26$	-----	VR

Tabla 5.3.- Combinaciones y factores de carga para postes troncocónicos

Fuente: Especificación CFE J6100-64

Para este caso en particular, se despreciará la consideración de presencia de hielo en la zona, debido a que el lugar donde se localiza la línea de transmisión no es considerada como una zona climática con presencia de hielo, tal como se muestra la Imagen 3.3.- Parámetros climáticos para Guadalajara, Jalisco.



Datos de entrada para la estimación de los árboles de carga en el poste troncocónico 1216 DMP:

Estructura 1216DMP		
Uso Remate deflexión	$\Delta$	0°
Claro medio horizontal	CMH	193 m
Claro vertical	CV	189 m

Presión de viento en cables		
Presión de viento max.	$P_{zc50}$	15.96 kg/m <sup>2</sup>
Presión de viento reducido	$P_{zcred}$	3.29 kg/m <sup>2</sup>

Presión de viento en estructura		
Presión de viento max.	$P_{ze50}$	42.63 kg/m <sup>2</sup>
Presión de viento reducido	$P_{zered}$	8.81 kg/m <sup>2</sup>
Presión de viento de servicio y mto.	$P_{ze}$	0.00 kg/m <sup>2</sup>

Tensiones mecánicas del cable conductor		
Tensión Vto. Máx. y Temp. 15°C	TVM	535 kg
Tensión Vto. Red. Y Temp. 0°C	TVR	523 kg
Tensión Servicio s/vto. Temp. 19.7°C	TS	500 kg

Tensiones mecánicas del cable de guarda		
Tensión Vto. Máx. y Temp. 15°C	TVMg	211 kg
Tensión Vto. Red. Y Temp. 0°C	TVRg	206 kg
Tensión Servicio s/vto. Temp. 19.7°C	TSg	200 kg

Datos del cable conductor 477 ACSR/AS		
Peso del cable conductor	WC	0.98 kg/m
Diámetro del conductor	$\phi_c$	0.0218 m
Peso de la cadena de aisladores	WA	50 kg
Diámetro de los aisladores	$\phi_g$	0.254 m
Longitud de la cadena de aisladores	LCA	1.6 m
No. de cadenas de aisladores x fase	NCAF	1
No. de conductores x fase	NCF	1
Carga vertical por mantenimiento	PVMc	500 kg

Datos del cable de guarda 5/16 AG-9		
Peso del cable de guarda	WG	0.389 kg
Diámetro del cable de guarda	DC	0.0079 m
Carga vertical por mantenimiento	PVMg	300 kg

Factores de carga		
Factor de componente transversal para tensión de cables (1-Rem, 2-Def/Susp)	FCT	1.00

Cálculo de árboles de carga para la condición de "**Servicio**":

Cargas debidas al cable conductor uso en Remate Cargas básicas (PC+PA+PE+FL+CT) * 1.0		
Peso del conductor	$PC= CV*NCF*WC$	185 kg
Peso de aisladores y herrajes	$PA= WA*NCAF$	50 kg
Viento en la estructura	$VE= P_{ze}$	0 kg/m <sup>2</sup>
Viento en conductores	$VC=CMH*\phi_c*NCF*P_{zc}$ $*\cos(\Delta/2)$	0 kg
Viento en aisladores	$VA= NCAF*\phi_g*LCA*P_{zc}$ $*\cos(\Delta/2)$	0 kg
Componente transversal de la Tensión	$CT= TS*NCF$ $*\sen(\Delta/2)*FCT$	0 kg
Componente longitudinal de la Tensión	$FL= TS*NCF*\cos(\Delta/2)$	500 kg

Cargas debidas al cable de guarda		
Peso del cable de guarda	$PC= CV*WG$	74 kg
Viento en cable de guarda	$VC= CMH*\phi_g*P_{zc}$ $*\cos(\Delta/2)$	0 kg
Componente transversal de la Tensión	$CT= TSg*\sen(\Delta/2)*FCT$	0 kg
Componente longitudinal de la Tensión	$FL= TSg*\cos(\Delta/2)$	200 kg

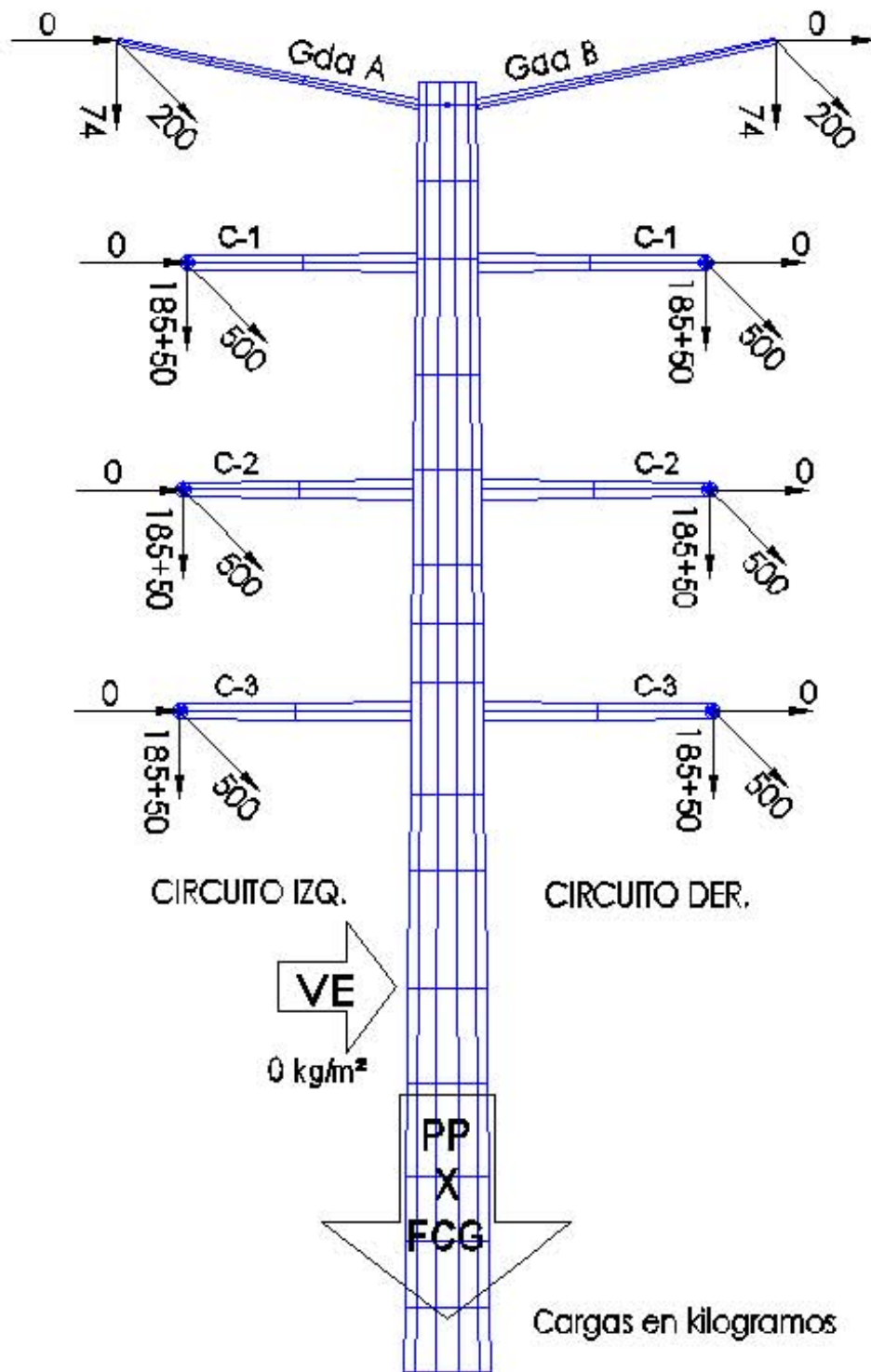


Figura 5.3.- Árbol de carga para la condición de "Servicio"

Fuente: Propia

Cálculo de árboles de carga para la condición de "**Viento máximo**":

Cargas debidas al cable conductor uso en Remate Cargas básicas (PC+PA+PE+VC+VE+FL+CT) * 1.26		
Peso del conductor	$PC= CV*NCF*WC$	185 kg
Peso de aisladores y herrajes	$PA= WA*NCAF$	50 kg
Viento en la estructura	$VE= P_{ze50}$	42.63 kg/m <sup>2</sup>
Viento en conductores	$VC= CMH*\phi_c*NCF*P_{zc50}$ $*\cos(\Delta/2)$	67 kg
Viento en aisladores	$VA= NCAF*\phi_g*LCA$ $*P_{zc50}*\cos(\Delta/2)$	13 kg
Componente transversal de la Tensión	$CT= TS*NCF$ $*\sen(\Delta/2)*FCT$	0 kg
Componente longitudinal de la Tensión	$FL= TS*NCF*\cos(\Delta/2)$	535 kg

Cargas debidas al cable de guarda		
Peso del cable de guarda	$PC= CV*WG$	74 kg
Viento en cable de guarda	$VC= CMH*\phi_g*P_{zc50}$ $*\cos(\Delta/2)$	24 kg
Componente transversal de la Tensión	$CT= TSg*\sen(\Delta/2)*FCT$	0 kg
Componente longitudinal de la Tensión	$FL= TSg*\cos(\Delta/2)$	211 kg

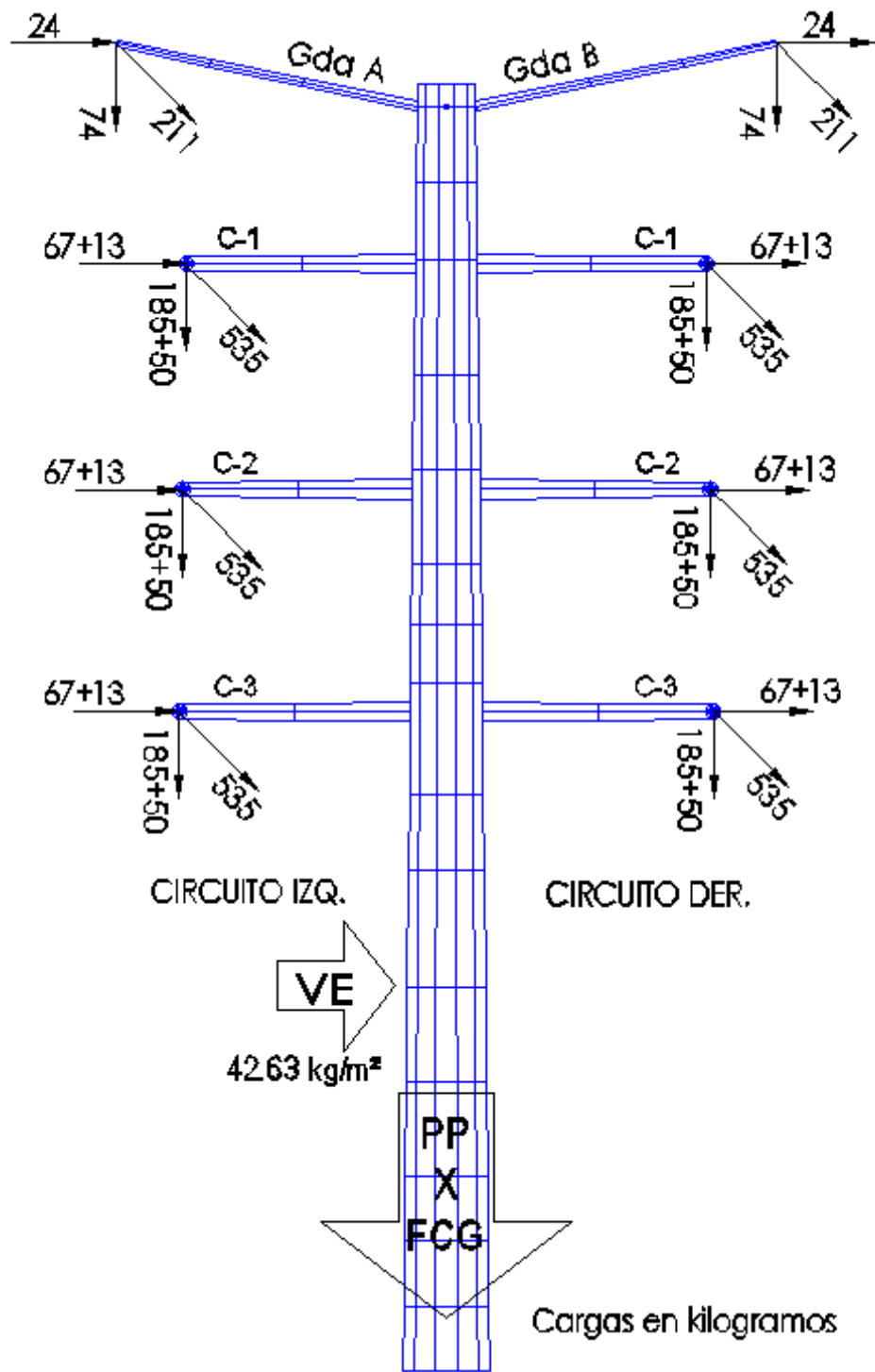


Figura 5.4.- Árbol de carga para la condición de "*Viento máximo*"

Fuente: Propia

Cálculo de árboles de carga para la condición de "**Viento reducido sin hielo**":

Cargas debidas al cable conductor uso en Remate Cargas básicas (PC+PA+PE+VC+VE+FL+CT) * 1.26		
Peso del conductor	$PC= CV*NCF*WC$	185 kg
Peso de aisladores y herrajes	$PA= WA*NCAF$	50 kg
Viento en la estructura	$VE= P_{zered}$	8.81 kg/m <sup>2</sup>
Viento en conductores	$VC= CMH*\phi_c*NCF*P_{zcred}*\cos(\Delta/2)$	14 kg
Viento en aisladores	$VA= NCAF*\phi_g*LCA*P_{zcred}*\cos(\Delta/2)$	3 kg
Componente transversal de la Tensión	$CT= TS*NCF*\sin(\Delta/2)*FCT$	0 kg
Componente longitudinal de la Tensión	$FL= TS*NCF*\cos(\Delta/2)$	523 kg

Cargas debidas al cable de guarda		
Peso del cable de guarda	$PC= CV*WG$	74 kg
Viento en cable de guarda	$VC= CMH*\phi_g*P_{zcred}*\cos(\Delta/2)$	5 kg
Componente transversal de la Tensión	$CT= TSg*\sin(\Delta/2)*FCT$	0 kg
Componente longitudinal de la Tensión	$FL= TSg*\cos(\Delta/2)$	206 kg

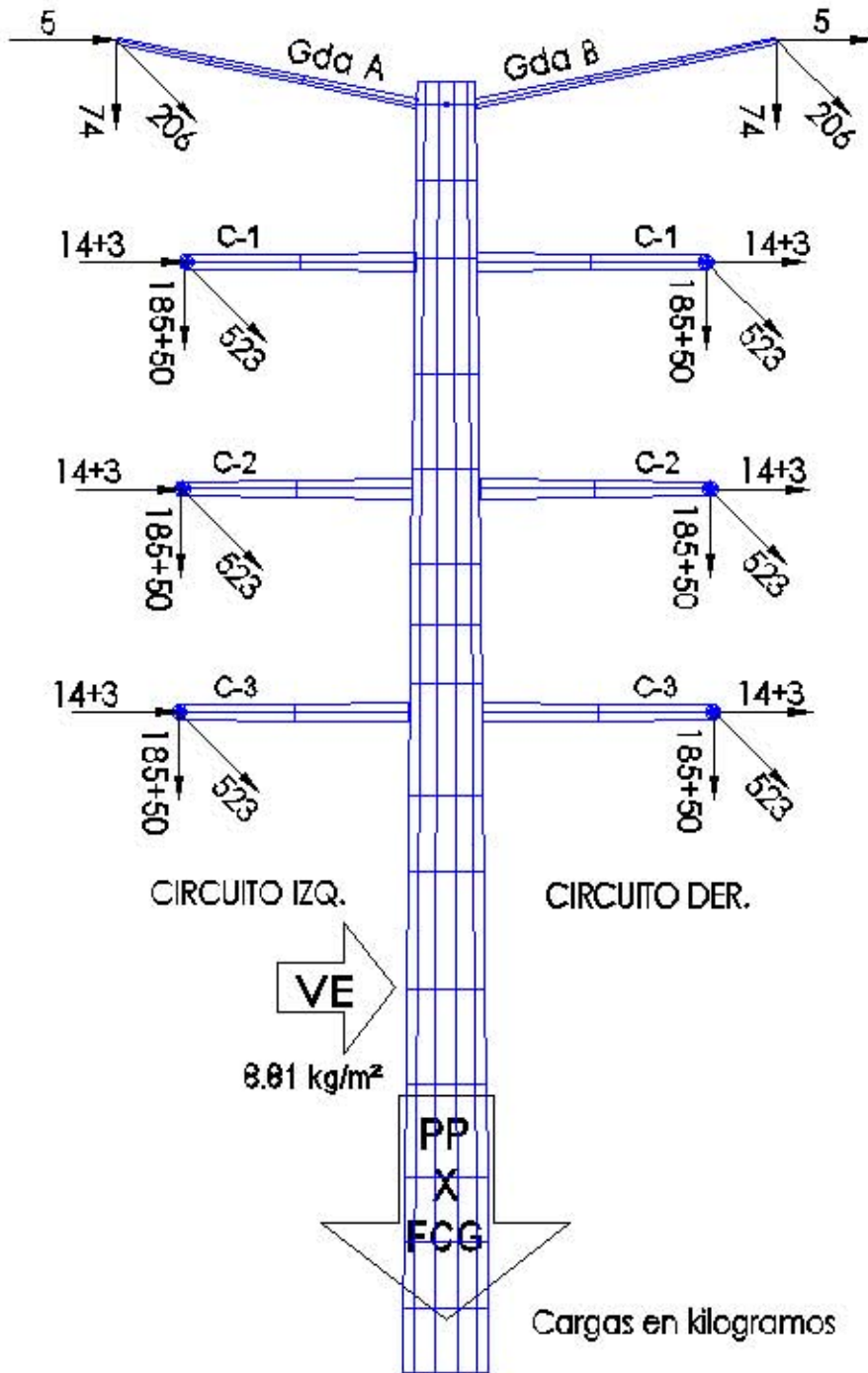


Figura 5.5.- Árbol de carga para la condición de "Viento reducido sin hielo"  
Fuente: Propia



Cálculo de árboles de carga para la condición de **"Tendido y mantenimiento"**:

Cargas debidas al cable conductor uso en Remate Cargas básicas (PC+PA+PE+PVM+FL+CT) * 1.0		
Peso del conductor	$PC= CV*NCF*WC$	185 kg
Peso de aisladores y herrajes	$PA= WA*NCAF$	50 kg
Viento en la estructura	$VE= P_{ze}$	0 kg/m <sup>2</sup>
Viento en conductores	$VC= CMH*\phi_c*NCF*P_{zc}$ $*\cos(\Delta/2)$	0 kg
Viento en aisladores	$VA= NCAF*\phi_g*LCA$ $*P_{zc}*\cos(\Delta/2)$	0 kg
Componente transversal de la Tensión	$CT= TS*NCF$ $*\sen(\Delta/2)*FCT$	0 kg
Componente longitudinal de la Tensión	$FL= TS*NCF*\cos(\Delta/2)$	500 kg
Carga vertical por mantenimiento	PVMc	500 kg

Cargas debidas al cable de guarda		
Peso del cable de guarda	$PC= CV*WG$	74 kg
Viento en cable de guarda	$VC= CMH*\phi_g*P_{zc50}$ $*\cos(\Delta/2)$	0 kg
Componente transversal de la Tensión	$CT= TSg*\sen(\Delta/2)*FCT$	0 kg
Componente longitudinal de la Tensión	$FL= TSg*\cos(\Delta/2)$	200 kg
Carga vertical por mantenimiento	PVMg	300 kg

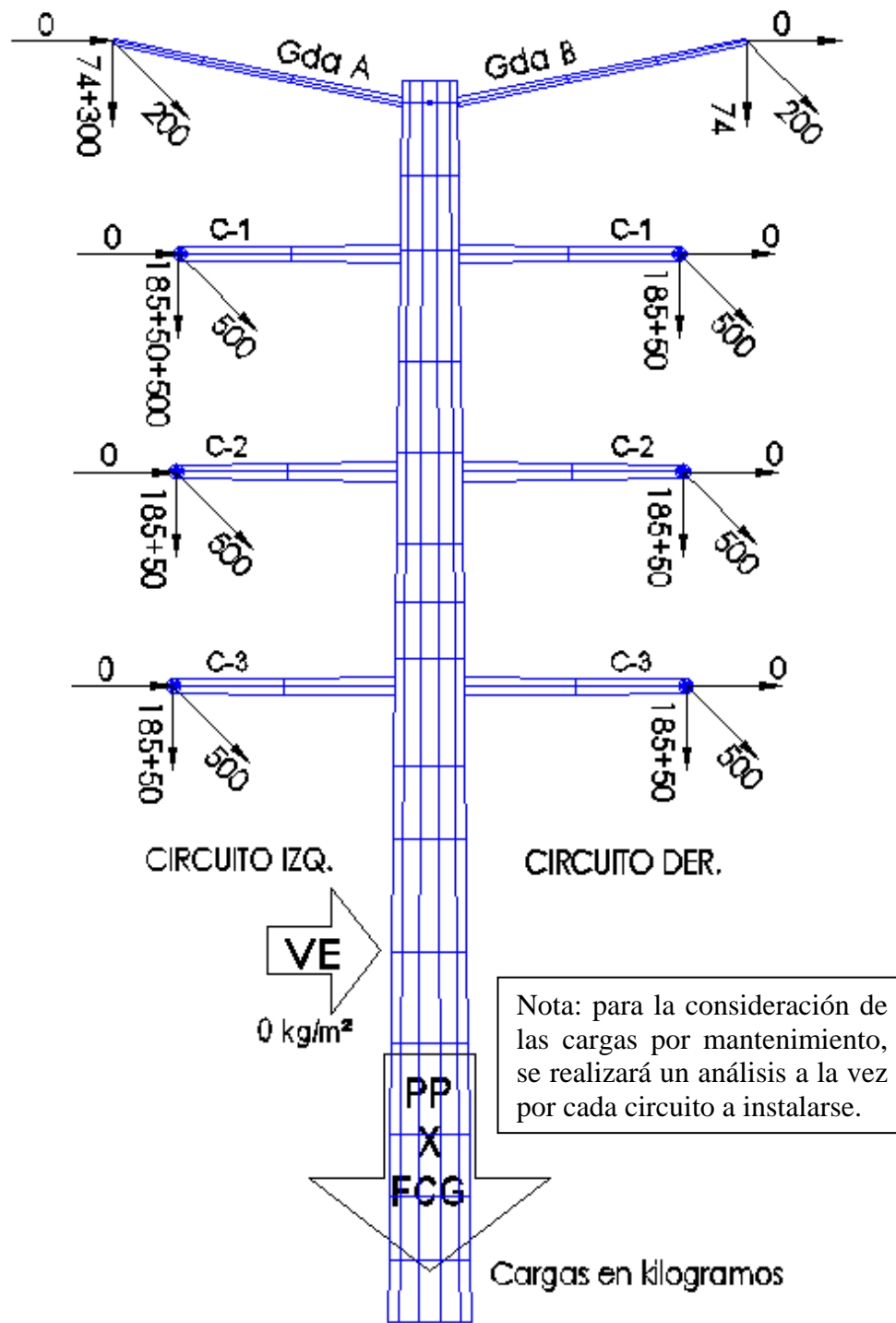


Figura 5.6.- Árbol de carga para la condición de "Tendido y mantenimiento"

Fuente: Propia

#### 5.4. Análisis estructural del poste troncocónico 1216 DMP asistido por computadora.

El objeto del análisis estructural es evaluar el poste troncoconico con las cargas actuantes y justificar técnicamente que la estructura es capaz de soportar los esfuerzos con las condiciones a las que será sometida durante su vida útil, en base a las especificaciones emitidas por la CFE.

El análisis del poste troncocónico 1216 DMP, se realizará mediante un programa de cálculo elástico implementado en computadora (PLS POLE). Este programa permite la resolución de sistemas hiperestáticos de múltiples incógnitas mediante planteo matricial del método de incógnitas geométricas, obteniendo los esfuerzos discretizados, así como su porcentaje de trabajo ante las solicitaciones presentadas.

##### Datos de salida del Software:

```
Project Name : L.T. Guadalajara II - Siderurgica
Project Notes: Poste 1216DMP
Project File  : d:\usuario\pole\1216dmp.pol
Date run     : 04:50:34 p.m. miércoles, 20 de noviembre de 2013
by          : PLS-POLE Version 12.30
Licensed to  : CFE - CPTT - Construction Area - Mexico
```

Successfully performed nonlinear analysis

The model has 0 warnings.

Loads from file: d:\usuario\pole\1216 tesis.lca

##### \*\*\* Analysis Results:

Maximum element usage is 36.64% for Tubular Davit "GDA-D" in load case "Tendido y mtto. Gda B"

Maximum insulator usage is 5.70% for Strain "ClFlADEL" in load case "Tendido y mtto. CircIzq Cl"

##### Summary of Joint Support Reactions For All Load Cases:

	Load Case	Joint	Long.	Tran.	Vert.	Shear	Tran.	Long.
Vert.								
Bending								
Found.								
Label	Force	Force	Force	Force	Moment	Moment	Moment	Moment
						Usage		
(kN-m)	(kN-m)					(kN)	(kN-m)	(kN-m)
		%				(kN)	(kN)	(kN)

```

-----
                Servicio   F:g -33.35  -0.10 -72.27  33.35  16.20 -701.66
20.24  701.84  0.00
Vtomax   F:g -44.86 -18.03 -93.52  48.35 305.75 -946.48  27.16  994.64  0.00
Vto red. s/hielo   F:g -43.86  -4.48 -89.78  44.09  92.55 -924.43  26.62
929.05  0.00
        Tendido y mtto. Gda A   F:g -33.35  -0.10 -75.21  33.35   6.90 -702.45
20.07  702.48  0.00
        Tendido y mtto. Gda B   F:g -33.35  -0.10 -75.21  33.35  29.21 -702.46
20.48  703.06  0.00
        Tendido y mtto. CircIzq C1   F:g -33.35  -0.10 -77.07  33.35   3.44 -702.77
20.02  702.78  0.00
        Tendido y mtto. CircIzq C2   F:g -33.35  -0.10 -77.07  33.35   3.34 -702.50
20.03  702.51  0.00
        Tendido y mtto. CircIzq C3   F:g -33.35  -0.10 -77.07  33.35   3.26 -702.26
20.06  702.26  0.00

```

**Summary of Tip Deflections For All Load Cases:**

**Note: positive tip load results in positive deflection**

Load Case	Joint	Long. Defl.	Tran. Defl.	Vert. Defl.	Resultant Defl.	Long. Rot.	Tran. Rot.	Twist
Label	Defl.	Defl.	Defl.	Defl.	Rot.	Rot.		
(deg)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(deg)	(deg)	(deg)	(deg)

```

-----
-
                Servicio   F:t 24.97  1.11 -0.19      26.00  1.01 -0.06 -
0.11
Vtomax   F:t 35.07 10.79 -0.37      36.69  1.36 -0.43 -0.15
Vto red. s/hielo   F:t 34.22  3.75 -0.33      34.43  1.33 -0.17 -0.15
        Tendido y mtto. Gda A   F:t 24.02  0.29 -0.20      26.02  1.01 -0.00 -
0.11
        Tendido y mtto. Gda B   F:t 24.02  2.24 -0.20      26.12  1.01 -0.15 -0.11
        Tendido y mtto. CircIzq C1   F:t 24.03  0.01 -0.20      26.03  1.01  0.01 -0.11
        Tendido y mtto. CircIzq C2   F:t 24.01  0.13 -0.20      26.01  1.01 -0.01 -0.11
        Tendido y mtto. CircIzq C3   F:t 23.99  0.33 -0.20      26.00  1.01 -0.03 -0.11

```

```

*** Weight of structure (N):
    Weight of Tubular Davit Arms:      5603.0
    Weight of Steel Poles:             47458.5
    Weight of Strains:                  6000.0
Total:                                  59061.5

```

\*\*\* End of Report

Reporte gráfico de esfuerzos en el poste troncocónico:

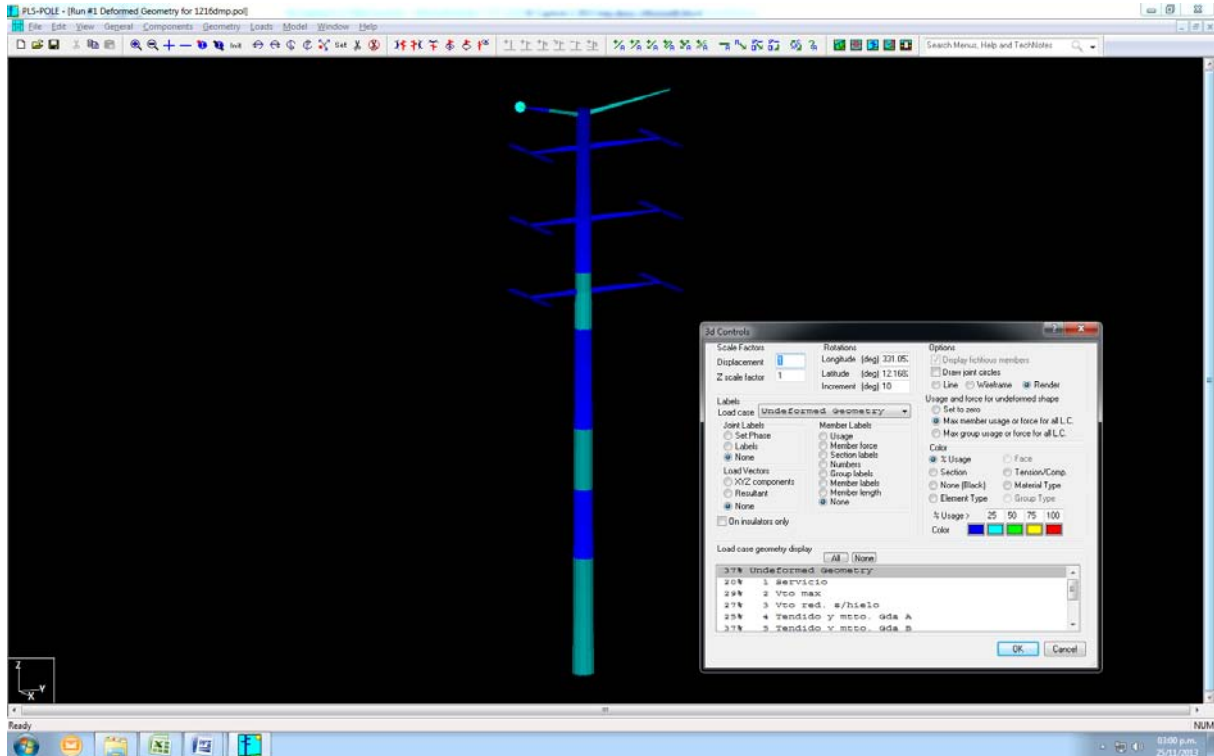


Figura 5.7.- Gráfica de esfuerzos en poste troncocónico 1216 DMP

Fuente: Propia

Interpretación de resultados:

Del análisis realizado se desprende que la estructura está trabajando al 36.64% en su condición más desfavorable, caso de carga "Tendido y mto Gda. B". por otro lado se observa que el desplazamiento en la punta para la condición de servicio es de 26.0 cm. y tenemos que la tolerancia de deformación es 3% de la altura del poste  $h=25.1 \text{ m} = 75.3 \text{ cm}$ , por tal motivo se acepta el poste troncocónico.

## 5.5. Características del suelo.

Como parte del alcance para el diseño y revisión de las cimentaciones de los postes troncocónicos, se requiere conocer las características del suelo, por tal motivo se requiere elaborar un Estudio Geotécnico que cumpla con las características que pide la norma de CFE C0000-43 "Estudios geotécnicos para Estructuras de Líneas de Transmisión".

A continuación se emiten las características del suelo en el sitio donde se instalarán los postes troncocónicos para la modernización de la L.T. Guadalajara II - Siderúrgica.

### PARAMETROS DEL SUBSUELO

Obra:	L.T. GUADALAJARA II-SIDERURGICA				
Ubicación:	GUADALAJARA, JAL.				
Fecha:	15/06/2012			Cliente N°:	4182
SONDEO:	<b>SPT-3</b>				
Tipo de material:	Prof. (m)	Cohesion  T/m <sup>2</sup>	Peso Vol Volumetrico ( $\gamma$ ) T/m <sup>3</sup>	Angulo friccion interna ( $\phi$ )	Clasif. S.U.C.S.
Arena pumitica limosa café oscuro	0.30-1.20	0.00	1.27	29.17	SM
Arena pumitica limosa color beige	1.20-2.40	0.00	1.29	29.76	SM
Arena limosa café amarillento	2.40-4.80	0.00	1.30	32.61	SM
Arena pumitica limosa gris claro	4.80-6.60	0.00	1.27	37.46	SM
Limo cementado café grisaceo	6.60-8.40	0.00	1.31	37.98	ML

Tabla 5.4.- Parámetros geotécnicos del subsuelo.

Fuente: Estudio geotécnico para la L.T. Guadalajara II - Siderúrgica.

**SPT-3 (Av. Gobernador Curiel y Av. López de Legazpi).**

Díámetro Mínimo (m)	Profundidad de desplante (m)	Capacidad portante admisible $Q_a$ (T)	Capacidad A tensión $Q_t$ (T)	Asentamiento esperado (cm)
0.80	7.00	112.26	17.77	<2.00
1.00	7.00	169.86	22.21	<2.00
1.60	7.00	413.51	35.55	<2.00
2.00	7.00	635.01	44.43	<2.00

s.

Parámetros del suelo:

$$c = 0.0 \text{ T/m}^2, \quad \gamma = 1.28 \text{ T/m}^3, \quad D_f = 8.00 \text{ m}, \quad \phi = 35.35^\circ, \quad F.S. = 4.0$$

Tabla 5.5.- Parámetros de capacidad de carga y resistencia del suelo.

Fuente: Estudio geotécnico para la L.T. Guadalajara II - Siderúrgica.

**5.6. Diseño de la cimentación a base de pila recta.**

Una vez obtenidos los datos del análisis estructural y del terreno se procede a realizar el diseño de la cimentación a base de pila recta.

Datos de entrada:

MECANICA DE MATERIALES	
Resistencia concreto	$f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$
Peso vol. Concreto	$\gamma_c = 2400 \text{ kg/m}^3$
Peso vol. Conc. c/NF	$\gamma_c = 1400 \text{ kg/m}^3$
Fluencia Acero	$f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$

PARÁMETROS DEL SUELO (ESTATIGRAFIA)					
No estrato	$\gamma_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	Espesor (cm)	cohesión c (kg/cm <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	$\tan\phi$
0	Afloramiento	100			
1	1270	30		0	0.0000
2	1270	90		29.17	0.5582
3	1290	120		29.76	0.5718

4	1300	240		32.61	0.6398
5	1270	180		37.46	0.7662
6	1310	180		37.98	0.7807

ELEMENTOS MECANICOS DE DISEÑO (Salida software PLS POLE)				
Poste	Load case	Vertical force	Shear force	Bending Moment
		kN	kN	kN-m
1216 DMP	VtoMax	93.52	48.35	994.64

PARAMETROS DE DISEÑO		Referencia
N <sub>C</sub> = 61.23	Adim	$N_c = Nq - 1 * \cot \phi$
N <sub>q</sub> = 48.80	Adim	$N'q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right)$
FC = 1.10	Adim	Factor de Carga a compresión CFE J1000-50
FR = 0.50	Adim	Factor de Reducción CFE JA100-64

Determinación de la capacidad a volteo:

Basado en el método 5.3.3.1 Brom's method 7 IEEE Std 691-2001, IEEE Engineering Society, páginas 100 - 101 "IEEE Guide for Transmission Structure Foundation Design and Testing"

De acuerdo a la teoría de Brom's la pila sometida a una carga horizontal, tiende a girar sobre un punto neutro. El suelo circundante es el que contrarresta el efecto, con la idealización de la distribución de esfuerzos tanto para suelos friccionantes como cohesivos.



# Análisis con software Caisson

CAISSON Versión 4.57 05:06:19 p.m. lunes, 25 de noviembre de 2013  
 Comisión Federal de Electricidad

\*\*\*\*\*  
 \*  
 \* PIER FOUNDATIONS ANALYSIS AND DESIGN - (C) 1995, POWER LINE SYSTEMS, INC.\*  
 \*  
 \*\*\*\*\*

\*\*\* ANALYSIS IDENTIFICATION : L.T. Guadalajara II - Siderúrgica  
 NOTES : Sondeo no. 3 (FR 0.5)

\*\*\* PIER PROPERTIES CONCRETE STRENGTH (MPa) = 24.51 STEEL  
 STRENGTH (MPa) = 448.16  
 DIAMETER (m) = 1.600 DISTANCE FROM TOP OF PIER TO GROUND LEVEL (m) = 1.00

*** SOIL PROPERTIES	LAYER	TYPE	THICKNESS	DEPTH AT TOP OF LAYER	DENSITY	CU
KP	PHI		(m)	(m)	(N/m <sup>3</sup> )	(Pa)
(degrees)						
		1 C	0.30	0.00	0.0	9807.0
		2 S	0.90	0.30	12454.0	
1.451 10.60		3 S	1.20	1.20	12454.0	
1.486 11.27		4 S	2.40	2.40	12749.0	
1.669 14.52		5 S	1.80	4.80	12454.0	
2.052 20.16		6 S	1.80	6.60	12847.0	
2.100 20.78						

\*\*\* DESIGN (FACTORED) LOADS AT TOP OF PIER MOMENT (kN-m) = 994.6 VERTICAL (kN) = 93.5 SHEAR (kN) = 48.4

FAILURE = 1.00 ADDITIONAL SAFETY FACTOR AGAINST SOIL

\*\*\* CALCULATED PIER LENGTH (m) = 6.172

\*\*\* CHECK OF SOILS PROPERTIES AND ULTIMATE RESISTING FORCES ALONG PIER

TYPE	TOP OF LAYER	BELOW TOP OF PIER	THICKNESS	DENSITY	CU	KP	FORCE
ARM	(m)	(N/m <sup>3</sup> )	(Pa)	(kN)	(m)		
1.15	C	1.00	0.30	0.0	9807.0		37.66
1.90	S	1.30	0.90	12454.0		1.451	35.13
2.88	S	2.20	1.20	12454.0		1.486	159.90
4.19	S	3.40	1.46	12749.0		1.669	414.92
5.35	S	4.86	0.94	12749.0		1.669	-382.08
5.99	S	5.80	0.37	12454.0		2.052	-216.43

\*\*\* SHEAR AND MOMENTS ALONG PIER

SAFETY FACTOR	DISTANCE BELOW TOP OF PIER (m)	SHEAR (kN)	MOMENT (kN-m)	WITH THE ADDITIONAL SAFETY FACTOR	WITHOUT ADDITIONAL
				SHEAR (kN)	

1028.9	0.00	49.1	1028.9	49.1
1059.2	0.62	49.1	1059.2	49.1
1086.1	1.23	19.7	1086.1	19.7
1091.0	1.85	-1.8	1091.0	-1.8
1077.3	2.47	-48.4	1077.3	-48.4
1024.2	3.09	-129.4	1024.2	-129.4
909.5	3.70	-251.8	909.5	-251.8
704.3	4.32	-419.7	704.3	-419.7
385.6	4.94	-570.5	385.6	-570.5
107.3	5.55	-324.8	107.3	-324.8
0.0	6.17	0.0	0.0	0.0

\*\*\* TOTAL REINFORCEMENT PCT = 0.32      REINFORCEMENT AREA (cm<sup>2</sup>) = 64.34  
 \*\*\* USABLE AXIAL CAP. (kN) = 93.5      USABLE MOMENT CAP. (kN-m) = 1741.7

\*\*\* Canadian Standard Metric Re-Bars (Select one of the following):

65 BARS #10 (AREA = 1.0 cm<sup>2</sup> DIA = 11.3 mm) AT SPACING (cm) = 6.51  
 33 BARS #15 (AREA = 2.0 cm<sup>2</sup> DIA = 16.0 mm) AT SPACING (cm) = 12.81  
 22 BARS #20 (AREA = 3.0 cm<sup>2</sup> DIA = 19.5 mm) AT SPACING (cm) = 19.22  
 13 BARS #25 (AREA = 5.0 cm<sup>2</sup> DIA = 25.2 mm) AT SPACING (cm) = 32.53  
 10 BARS #30 (AREA = 7.0 cm<sup>2</sup> DIA = 29.9 mm) AT SPACING (cm) = 42.29  
 7 BARS #35 (AREA = 10.0 cm<sup>2</sup> DIA = 35.7 mm) AT SPACING (cm) = 60.41  
 5 BARS #45 (AREA = 15.0 cm<sup>2</sup> DIA = 43.7 mm) AT SPACING (cm) = 84.57

\*\*\* PRESSURE UNDER CAISSON DUE TO DESIGN AXIAL LOAD (Pa) = 46512.9

Del análisis ante capacidad de carga lateral obtenemos que la longitud de la pila de diseño es de L= 6.17 m considerando afloramiento. Por lo tanto, se propone una profundidad de la cimentación L = 5.20 m

CARACTERISTICAS GEOMETRICAS	
Profundidad de desplante	L = <b>520</b> cm
Diámetro de Pila	D = <b>160</b> cm
Afloramiento	a = <b>100</b> cm
Recubrimiento	r = <b>10</b> cm

## Revisión de los esfuerzos a compresión:

Capacidad de carga última por punta para suelos friccionantes:

$$Q_p = P'z \cdot N'q \left( \frac{\pi B^2}{4} \right) = 302,449 \text{ kg}$$

$$P'z = L \cdot \gamma_s / 2 = 5.2 \text{ m} \cdot 1270 \text{ kg/m}^3 / 2 = 3,302 \text{ kg/m}^2$$

$$N'q = 45.57$$

$$\left( \frac{\pi B^2}{4} \right) = 2.01 \text{ m}^2$$

Capacidad de carga última por fricción para suelos friccionantes:

$$Q_s = \pi \cdot D \sum_{i=1}^n P'_{hm} \cdot \tan \phi \cdot L = 27,373 \text{ kg}$$

$$D = 1.6 \text{ m}$$

$$P'_{hm} \text{ estrato 1} = 191 \text{ kg/m}^2 \quad \tan \phi = \tan 0.00^\circ = 0.000 \quad L = 0.30 \text{ m}$$

$$P'_{hm} \text{ estrato 2} = 762 \text{ kg/m}^2 \quad \tan \phi = \tan 29.17^\circ = 0.558 \quad L = 0.90 \text{ m}$$

$$P'_{hm} \text{ estrato 3} = 1,346 \text{ kg/m}^2 \quad \tan \phi = \tan 29.76^\circ = 0.572 \quad L = 1.20 \text{ m}$$

$$P'_{hm} \text{ estrato 4} = 2,334 \text{ kg/m}^2 \quad \tan \phi = \tan 32.61^\circ = 0.640 \quad L = 2.40 \text{ m}$$

$$P'_{hm} \text{ estrato 5} = 1,814 \text{ kg/m}^2 \quad \tan \phi = \tan 37.46^\circ = 0.766 \quad L = 0.40 \text{ m}$$

La capacidad de carga última de la pila es:

$$R = Q_p \cdot FR + Q_s \cdot FR$$

$$R = 302,449 \text{ kg} (0.5) + 27,373 \text{ kg} (0.5) = 164,911 \text{ kg}$$

La carga máxima sobre terreno:

$$Q_{max} = (C + W_c) * 1.1$$

$$C = 93.5 \text{ kN} = 9,534 \text{ kg}$$

$$W_c = \text{Area pila} * (L + A_{floram}) * \gamma_c = 2.01 \text{ m}^2 * (5.2+1.0) \text{ m} * 2,400 \text{ t/m}^3 = 29,910 \text{ kg}$$

$$Q_{max} = (9,534 + 29,910) * 1.1 = 43,388.4 \text{ kg.}$$

Verificando el factor de seguridad ante capacidad de carga:

$$FSC = R / Q_{max} = 164,911 / 43,388 = 3.8$$

se acepta la sección por capacidad de carga

### Revisión de los asentamientos:

$$P_i = \frac{0.36 * Q_{max} * D}{10 * A * E_u} = 0.007 \text{ m} = 0.71 \text{ cm}$$

$$Q_{max} = 43,388.4 \text{ kg}$$

$$D = 1.60 \text{ m}$$

$$A = 2.01 \text{ m}^2$$

$$E_u = 1,750,000 \text{ kg/m}^2$$

$$P_i = 0.71 \text{ cm} < 5 \text{ cm} \text{ por especificación CFE JA100-64}$$

Se acepta la sección por Asentamientos

### Diseño estructural de la pila:

Refuerzo longitudinal

La revisión estructural de la pila se realizará siguiendo los lineamientos del ACI-318 en su sección de columnas y se realizará por medio del software SPColum.

De acuerdo al reglamento ACI, si  $P_u$  es menor que  $0.10 \cdot f'_c \cdot A_g$  se considerará una sección en flexión.

$$A_{s_{min}} = 1\% A_g \text{ de la sección } A_s = 201.6 \text{ cm}^2$$

DATOS DE ENTRADA		
Diámetro de Pila	D =	1.6 m
Recubrimiento	r =	0.1 m
Carga Axial factorizada	$P_u$ =	43.4 t
Momento de flexión	$M_u$ =	177.6 t-m

$$43.4 \text{ t} < 0.1 \cdot 2500 \text{ t/m}^2 \cdot 2.01 = 502.5 \text{ t}$$

Se verifica que la columna es una sección en flexión

Nota: El valor del momento de flexión se obtuvo del análisis por capacidad de carga lateral.

Revisión por SP Column:

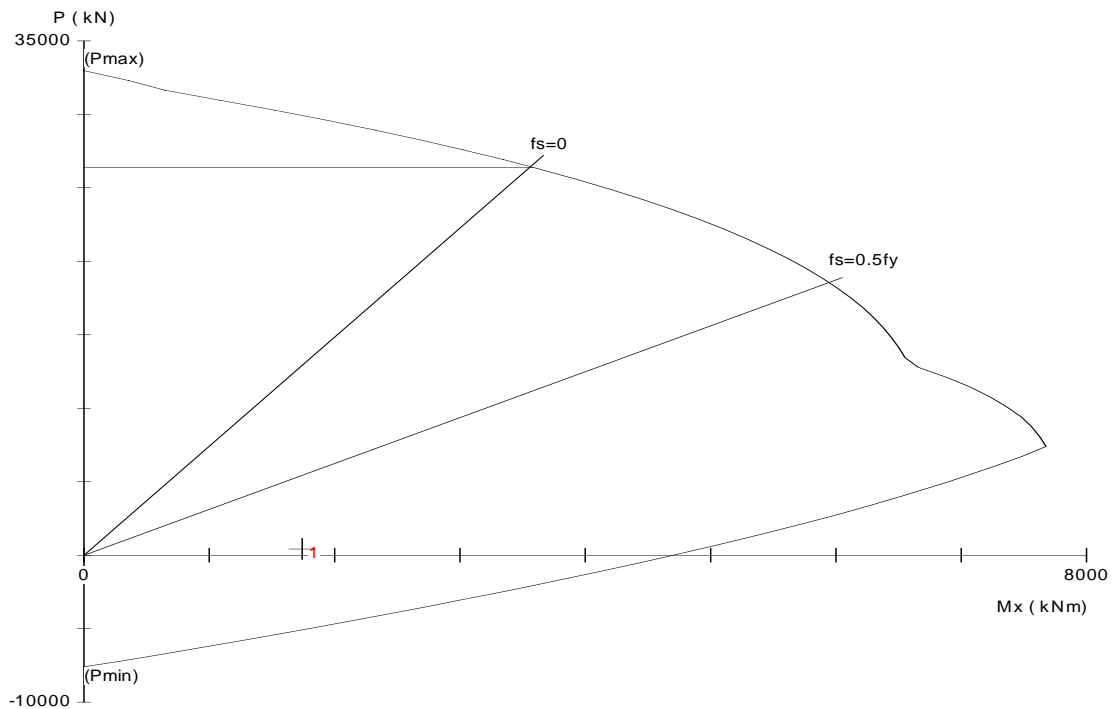


Figura 5.8.- Gráfica de diagrama de interacción P - M

Fuente: Software SPColumn

Se observa que la columna está trabajando a flexo compresión cumpliendo los parámetros de resistencia conforme al ACI-318 ante las solicitaciones actuantes.

STRUCTUREPOINT - spColumn v4.20 (TM)  
 c:\users\erik.erik-pc\documents\tesis eriktafolla 2013\pilaposte.col  
 08:08 AM

General Information:

```

=====
File      Name:      c:\users\erik.erik-pc\documents\tesis      eriktafolla
2013\pilaposte.col
Project:   LT GDL-SID
Column:    P-1216DMP      Engineer:
Code:      ACI 318-05      Units: Metric

Run Option: Investigation      Slenderness: Not considered
Run Axis:   X-axis            Column Type: Structural
  
```

Material Properties:

```

=====
f'c      = 25 MPafy      = 413.7 MPa
Ec       = 23500 MPa      Es      = 199955 MPa
Ultimate strain = 0.003 mm/mm
Beta1    = 0.85
  
```

Section:

```

=====
Circular:   Diameter = 1600 mm

Gross section area, Ag = 2.01062e+006 mm^2
Ix = 3.21699e+011 mm^4      Iy = 3.21699e+011 mm^4
Xo = 0 mm                  Yo = 0 mm
  
```

Reinforcement:

```

=====
Bar Set: ASTM A615
Size Diam (mm) Area (mm^2) Size Diam (mm) Area (mm^2) Size Diam (mm)
Area (mm^2)
-----
# 3      10      71 # 4      13      129 # 5      16
200
# 6      19      284 # 7      22      387 # 8      25
510
# 9      29      645 # 10     32      819 # 11     36
1006
# 14     43      1452 # 18     57      2581
  
```

Confinement: Tied; #3 ties with #10 bars, #4 with larger bars.  
 phi(a) = 0.8, phi(b) = 0.9, phi(c) = 0.65

Layout: Circular

Pattern: All Sides Equal (Cover to transverse reinforcement)  
 Total steel area: As = 20387 mm<sup>2</sup> at rho = 1.01%  
 40 #8 Cover = 100 mm

Factored Loads and Moments with Corresponding Capacities:

Phi	No.	Pu kNkNm	Mux kNm	fMnxfMn/Mu mm	N.A. depth	eps_t
1	425.70	1741.70	4916.37	2.823	328.33	0.01050 0.900

\*\*\* End of output \*\*\*

### Revisión por cortante de la pila:

Se debe cumplir que el cortante resistente Vn multiplicado por un factor de reducción  $\phi$ , deberá ser mayor o igual que el cortante último actuante en la sección transversal de la pila.

$$\phi V_n \geq V_u$$

Revisando si la sección de concreto es capaz de resistir el cortante actuante:

$$V_c = \phi * 0.53 \sqrt{f'c} * D * d = 0.75 * 0.53 * (250)^{0.5} * 160 \text{ cm} * 150 \text{ cm} = 150,840 \text{ kg}$$

$$V_u = 570.5 \text{ kN} = 58,155 \text{ kg}$$

La sección de concreto es capaz de resistir el cortante actuante.

Se procederá a colocar acero de refuerzo a cortante por contracción y temperatura únicamente:

Se propone la colocación de estribos varilla # 4 Az= 2.53 cm<sup>2</sup> (área transversal 2 ramas)

Por lo tanto, la separación máxima por confinamiento es:

$$s = d / 2 = 75 \text{ cm}$$

$$s = 16\phi \text{ var longitudinal} = 40.6 \text{ cm}$$

$$s = 48\phi \text{ estribo} = 60.9 \text{ cm}$$

Revisión de la separación del refuerzo mínimo a cortante para estribos individuales:

$$s = \frac{A_z * f_y}{3.5 * d} = \frac{2.53 \text{ cm}^2 * 4200 \text{ kg/cm}^2}{3.5 * 150 \text{ cm}} \quad s = 19.3 \text{ cm}$$

Se propone colocar estribos @ 19 cm

Nota: el valor de Vu fue obtenido del análisis por capacidad de carga lateral

El cortante resistente por los estribos @ 19 cm es:

$$V_s = \left[ \frac{A_v * f_y * d}{s} \right] = 2.53 \text{ cm}^2 * 4200 \text{ kg/cm}^2 * 150 \text{ cm} / 19 \text{ cm}$$

$$\mathbf{V_s = 83, 889 \text{ kg}}$$

Revisión final del cortante resistente respecto al cortante último:

$$\varphi(V_c + V_s) \geq V_u$$

$$0.75 ( 201,120 \text{ kg} + 83,889 \text{ kg} ) = \mathbf{213,764 \text{ kg} > 58,155 \text{ kg}}$$

Se acepta la sección de acero a cortante



## Análisis de resultados:

En base a las consideraciones realizadas con las cargas actuantes para el proyecto de la modernización de la L.T. Guadalajara II - Siderúrgica en el tramo de la Av. López de Legazpi, se emiten los resultados de la Resistencia mecánica del poste, deformación y capacidad de carga de la cimentación, concluyendo que los postes troncocónicos a instalar son capaces de soportar las cargas de proyecto cumpliendo con los parámetros de seguridad en base a las normas establecidas.

Condición de carga Poste 1216 DMP	Trabajo máximo %	Reacciones			Deformación (cm)	Deformación Permisible (cm)
		Vertical (kN)	Cortante (kN)	Momento (kN-m)		
Servicio	17.57	72.27	33.35	701.84	26.0	75.3
Viento Máximo	24.17	93.52	305.75	994.64	36.69	-----
Viento Reducido	22.15	75.21	92.55	929.05	34.43	-----

Cimentación Pila Ø 1.6 m	Factor de Seguridad	Resistencia del terreno (ton)	Carga actuante (ton)	Asentamiento (cm)	Asentamiento permisible (cm)
Carga actuante Viento máximo	3.49	210.89	60.38	0.38	5.0

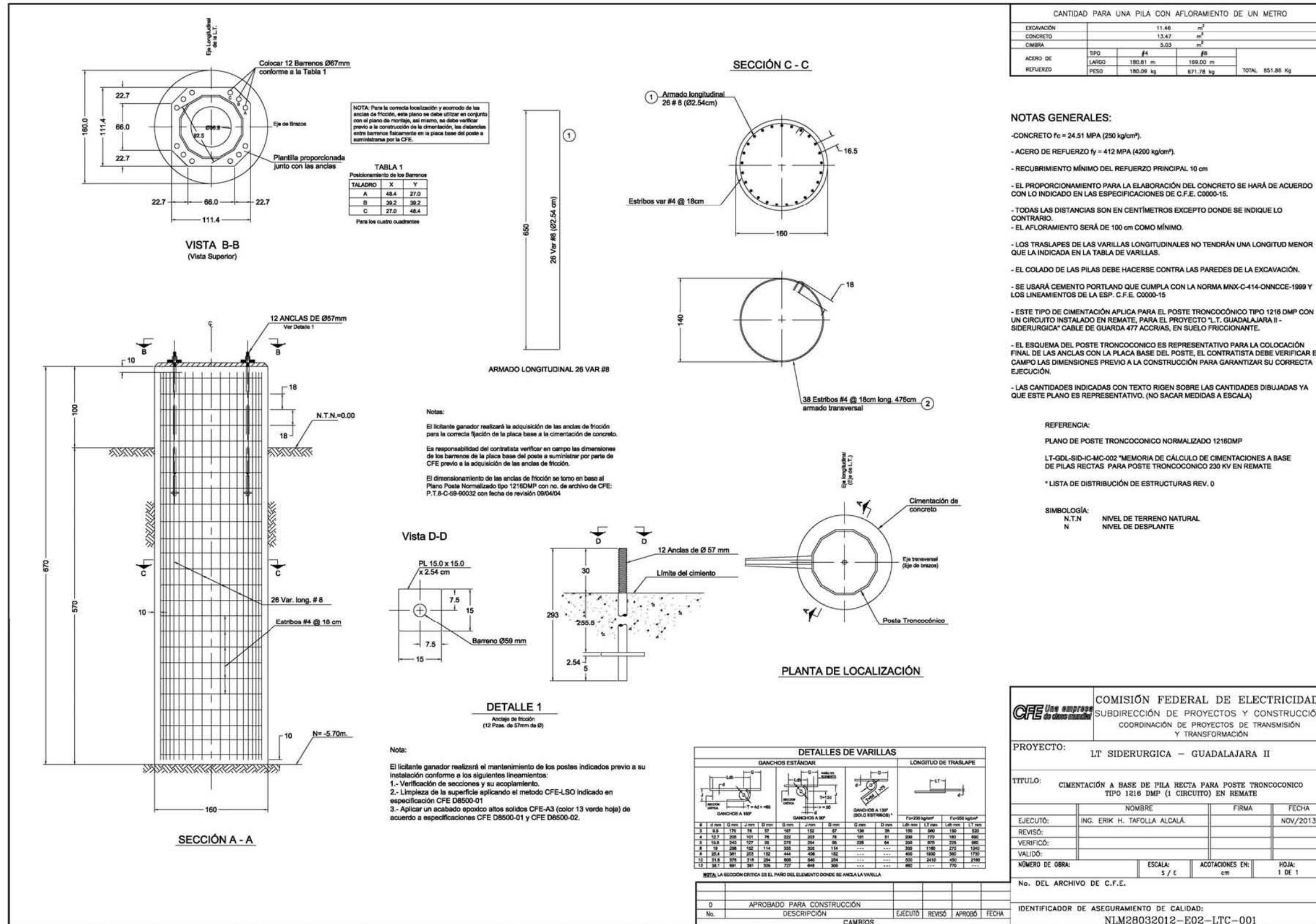


Figura 5.9.- Plano final para la construcción de la Cimentación del poste troncocónico 1216DM  
 Fuente: Software SPColumn

## CONCLUSIÓN

Dentro de la presente tesis se ha verificado que los postes troncocónicos de acero galvanizado son una buena opción para modernizar la L.T. Guadalajara II – Siderúrgica, en particular el tramo en la Av. López de Legazpi, debido al desgaste natural de los postes de madera instalados actualmente, y por la seguridad del sistema eléctrico en la zona como de la vialidad, se requiere realizar la sustitución por postes troncocónicos de acero galvanizado, ya que cumplen satisfactoriamente las solicitudes actuantes y garantizan prolongar la vida útil del sistema eléctrico.

Los resultados obtenidos para el poste troncocónico 1216 DMP analizado, indican que tanto el poste como su cimentación, cumplen los requisitos de las normas de CFE JA100 64 “ Cimentaciones para estructuras de Líneas de Transmisión”; CFE J6100 54 “ Postes metálicos para Líneas de Transmisión y Transformación”, y Reglamento para concreto estructural (ACI - 318 - 08). Por lo tanto se concluye que el objetivo principal de esta investigación se aprueba satisfactoriamente ya que se demostró que los postes troncocónicos a instalar, así como su cimentación, prueban ser sustentables para la modernización de la L.T. Guadalajara II – Siderúrgica, en particular el tramo en la Av. López de Legazpi, ya que cuentan con los factores de seguridad, minimizando dimensiones conforme a especificaciones, utilizando las solicitudes actuantes y no las máximas soportadas por la estructura, dando como resultado economía y seguridad.

Las ventajas y desventajas de utilizar postes troncocónicos de acero galvanizado vs postes de madera radican principalmente en las siguientes características:

#### Ventajas:

- Mejor relación carga – peso.
- Mantenimiento preventivo menor al considerado para un poste de madera.
- Se permite alargar los claros de tendido hasta en 200% con relación a los postes de madera.
- Altura de los postes troncocónicos mayores a los de madera.
- Protección en la base del poste ante impacto de vehículos.
- Mayor confiabilidad para dar mantenimiento eléctrico al personal de maniobras.
- Mayor vida útil en relación a los postes de madera.
- Soporta mayores cargas de Tensión del cable conductor.

#### Desventajas:

- Mayor costo de inversión.
- Requieren de una cimentación robusta y costosa.
- Ocupan más espacio en relación a los postes de madera
- Maniobra para instalación costosa
- Mayor impacto visual a la comunidad.
- Sustituciones o retiro total onerosos.
- Maniobras para transporte complicada debido a su gran peso.

En base a las consideraciones realizadas con las cargas actuantes para el proyecto de la modernización de la L.T. Guadalajara II – Siderúrgica, se concluye que la alternativa de sustitución de postes de madera por del tipo troncocónicos de acero galvanizado, es la mejor alternativa para garantizar el suministro eléctrico al cliente final, optimizando la distribución de estructuras, economizando al máximo y siguiendo al margen la normatividad y especificaciones que la CFE marca para los diseños de líneas de transmisión, cumpliendo satisfactoriamente el objetivo general de la presente investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

ACI 318S-08 (2008)

Reglamento para concreto Estructural

IMCYC, México.

CFE / EIESA (2013)

Manual de diseño civil de líneas de transmisión aéreas CFE (2013)

CFE. México.

CFE / Instituto de Investigaciones Eléctricas (2008)

Manual de diseño por viento

CFE. México.

Especificación CFE JA100-64 (2011)

Cimentaciones para Líneas de Transmisión

CFE. México.

Especificación CFE J6100-54 (2011)

Postes metálicos para Líneas de Transmisión y Subtransmisión

CFE. México.

Hernández Sampieri Roberto y Cols. (2010)

Metodología de la Investigación

Mcgraw-Hill. México.

IEEE Power Engineering Society (2001)

691 IEEE Guide for Transmission Structure Foundation Design and Testing

IEEE. USA.

Tamez González Enrique (2001)

Ingeniería de Cimentaciones

TGC Geotecnia. México.

## **OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN**

- Estudio Geotécnico, para la L.T. Guadalajara II – Siderúrgica, realizado por “Ingeniería en Mecánica de Suelos y Control de Occidente S.A. de C.V.”
- Google Earth.
- <http://es.wikipedia.org>.
- [http://www.powline.com/products/pls\\_pole-espanol.html](http://www.powline.com/products/pls_pole-espanol.html).
- [http://www.structurepoint.org/soft/software-profile.asp?l\\_family\\_id=40](http://www.structurepoint.org/soft/software-profile.asp?l_family_id=40).
- Normalización de la CFE [http://lapem.cfe.gob.mx/normas/qbe\\_nrf.asp](http://lapem.cfe.gob.mx/normas/qbe_nrf.asp)