



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**ANÁLISIS DE UNA TORRE DE  
TRANSMISIÓN ELÉCTRICA ANTE LOS  
EFECTOS DE VIENTO ATMOSFÉRICO Y DE  
TROMBA: RELACIÓN DEL COSTO DE LA  
TORRE EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL  
VIENTO**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

P R E S E N T A :

**ALEJANDRO BARRAGÁN TOLENTINO**

TUTOR:

**DR. ADRIÁN POZOS ESTRADA**  
INSTITUTO DE INGENIERÍA



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.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Roberto Gómez Martínez  
Secretario: M.I. Hector Sangines García  
Vocal: Dr. Adrián Pozos Estrada  
1er. Suplente: Ing. Héctor Alfredo Legorreta cuevas  
2do. Suplente: Ing. Carlos Edgar Rivas Mendoza

Tesis realizada en:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

**TUTOR DE TESIS:**

**DR. ADRIÁN POZOS ESTRADA**

---

**FIRMA**



DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/146/2013

Señor  
**ALEJANDRO BARRAGÁN TOLENTINO**  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. ADRIAN POZOS ESTRADA que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted conforme a la opción I. "Titulación mediante tesis o tesina y examen profesional", para obtener su título en INGENIERIA CIVIL.

**"ANÁLISIS DE UNA TORRE DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA ANTE EFECTOS DE VIENTO ATMOSFÉRICO Y DE TROMBA: RELACIÓN DEL COSTO DE LA TORRE EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO"**

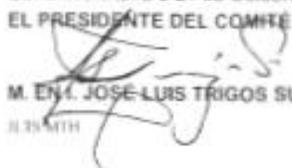
**INTRODUCCIÓN**

- I. ASPECTOS GENERALES DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN**
- II. MODELACIÓN MATEMÁTICA DE UNA TORRE DE TRANSMISIÓN**
- III. ANÁLISIS DE UNA TORRE DE TRANSMISIÓN SUJETA A EFECTOS DE VIENTO DE DIFERENTES MAGNITUDES**
- IV. ANÁLISIS DE UNA TORRE DE TRANSMISIÓN SUJETA A EFECTOS DE VIENTO GENERADOS POR UNA TROMBA**
- V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de esta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 21 de Octubre de 2013  
EL PRESIDENTE DEL COMITÉ

  
**M. EN. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ**  
R. TRIGOS

## AGRADECIMIENTOS

A mi padre, por todo el apoyo, cariño, educación y soporte que me ha brindado a lo largo de todo este tiempo, por todas aquellas enseñanzas que me ha dado y experiencias que hemos vivido

A mi madre por todos sus consejos, cariño y apoyo que me ha dado para no dejarme caer en momentos difíciles

Al Dr. Roberto Gómez ya que sin su apoyo este trabajo no habría sido posible

Al Dr. Adrián Pozos por tomar parte de su tiempo para revisar y comentar mi trabajo, para poderlo llevar a cabo

A la Facultad de Ingeniería de la UNAM por permitirme ser parte de esta institución de la cual siempre estaré orgulloso

A mis primos, tíos y demás familia que siempre estuvieron y están al tanto de mi

A Andrea por su compañía y amor que siempre me brinda

A todos mis grandes amigos que hice a lo largo de la carrera

## Índice

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1 Aspectos generales de las líneas de transmisión .....</b>	<b>3</b>
1.1. Componentes de las líneas de transmisión .....	3
1.2. Componentes y clasificación de las torres de transmisión.....	3
1.3 Aspectos para el diseño de torres de transmisión .....	6
1.3.1 Requisitos para el diseño de torres de transmisión.....	6
1.3.1.1 Velocidad del viento .....	6
1.3.1.3 Determinación de la presión del viento sobre las torres de transmisión.....	12
1.3.1.4 Factor de respuesta dinámica para torres de transmisión .....	13
1.3.1.5. Cálculo del coeficiente de arrastre .....	14
1.3.2 Cargas en torres de transmisión.....	17
1.3.3 Condiciones básicas de carga .....	17
1.3.4 Combinaciones y factores de carga .....	19
1.3.4.1 Consideraciones básicas para el cálculo de cargas .....	19
<b>Capítulo 2 Modelación matemática de una torre de transmisión .....</b>	<b>21</b>
2.1 Modelación en computadora .....	21
2.2 Características geométricas de los elementos de las torres de transmisión .....	23
2.3 Propiedades de los materiales de la torre de transmisión analizada .....	25
2.4 Modelación de la torre de transmisión .....	26
<b>Capítulo 3 Análisis de una torre de transmisión sujeta a efectos de viento de diferentes magnitudes.....</b>	<b>29</b>
3.1 Descripción del fenómeno de viento .....	29
3.2 Análisis ante carga de viento.....	33
3.2.1 Parámetros para la determinación de la presión de viento .....	34
3.2.2 Presión de viento sobre la torre .....	34
3.3 Análisis ante carga muerta.....	36
3.4 Combinación de carga.....	38
3.5 Comparación y análisis de resultados.....	41
3.5.1 Metodología de análisis para relacionar la velocidad de viento y el costo de la torre .....	41
3.5.2 Revisión de los elementos de la torre de transmisión.....	41
3.5.2.1 Combinaciones de carga para revisión .....	42

3.5.2.2 Resistencia de las secciones.....	42
3.5.2.2.1 Elementos en tensión .....	42
3.5.2.2.2 Elementos en compresión .....	43
3.5.2.2.3 Factor de reducción por esbeltez.....	43
3.5.2.2.3 Elementos a flexión.....	44
3.5.2.2.4 Cortante en la dirección mayor .....	45
3.5.3 Presiones en la torre para diferentes paneles .....	45
3.5.4 Desplazamientos de la torre por la acción del viento .....	46
3.5.5 Estimación del peso de la torre.....	47
3.5.6 Costo de la torre de transmisión.....	48
<b>Capítulo 4 Análisis de una torre de transmisión sujeta a efectos de viento generados por una tromba .....</b>	<b>51</b>
4.1 Descripción del fenómeno de tromba (downburst) .....	51
4.2 Análisis ante carga de viento por tromba.....	53
4.2.1 Determinación de velocidades para el fenómeno de tromba .....	53
4.2.2 Determinación de las presiones generadas por el viento debido a la tromba .....	54
4.3 Combinación de carga.....	56
4.4 Comparación y análisis de resultados.....	58
4.4.1 Metodología de análisis .....	58
4.4.2 Revisión de los elementos de la torre de transmisión.....	58
4.4.3 Presión sobre los paneles por viento generado por tromba .....	60
4.4.4 Desplazamientos horizontales de la torre de transmisión generados por la acción de viento debido a tromba (downburst).....	61
4.4.5 Estimación del peso de la torre de transmisión bajo efectos de tromba.....	62
4.4.6 Costo de la torre de transmisión .....	63
<b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>66</b>
Conclusiones.....	66
Recomendaciones.....	67
<b>Referencias y bibliografía .....</b>	<b>68</b>
<b>Anexo 1 .....</b>	<b>70</b>

## INTRODUCCIÓN

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

La infraestructura para conducir la energía eléctrica son las líneas de transmisión, las cuales son soportadas por las torres de transmisión, las que a su vez deben ser capaces de soportar las distintas acciones a las que se verán sometidas a lo largo de su vida útil.

Es importante mencionar que las torres de transmisión están diseñadas para soportar acciones extraordinarias, generadas por fenómenos meteorológicos cíclicos. La falla de alguno de los elementos que conforman la torre puede representar grandes pérdidas económicas e incluso pérdida de vidas humanas debido a la suspensión del suministro de energía eléctrica en hospitales, escuelas, fábricas y casas habitación.

Las cargas a las que se encuentra sujeta una torre de transmisión son debidas a la masa de la línea de transmisión y accesorios, a las maniobras de tendido durante la construcción y mantenimiento, además de las cargas generadas por el viento. Algunos otros efectos climatológicos que deben soportar las torres de transmisión son los generados por el hielo y temperaturas extremas.

Un factor importante para el diseño de las torres de transmisión es su ubicación, ya que ésta dictará la magnitud de los efectos climatológicos a los que estará sujeta la estructura.

Debido a la importancia de estas estructuras, se decidió analizarlas bajo el efecto del viento atmosférico y trombas, con la finalidad de obtener la relación que existe entre el costo de las torres y la velocidad del viento a la que están expuestas.

En el capítulo 1 se muestran los componentes de una línea de transmisión y los aspectos de diseño para torres de transmisión ante presiones generadas por la acción del viento atmosférico.

En el capítulo 2 se presentan las características de la estructura de una torre de transmisión para su modelación utilizando el software SAP2000.

En el capítulo 3 se analiza una torre de transmisión sujeta a efectos del viento atmosférico de diferentes magnitudes y se obtiene la relación entre el costo de la estructura y la velocidad del viento.

En el capítulo 4 se analiza la misma torre de transmisión, pero ahora bajo efectos del viento generado por el fenómeno de tromba y se obtiene la relación del costo de la estructura y la velocidad máxima del viento de la tromba.

Finalmente, se presentan las conclusiones y comentarios obtenidos de los resultados de los análisis descritos en los capítulos anteriores.

## Capítulo 1

### Aspectos generales de las líneas de transmisión

#### 1.1. Componentes de las líneas de transmisión

La función de las líneas de transmisión es llevar la energía eléctrica desde los puntos de generación hasta el lugar de consumo. Esta transmisión puede ser subterránea o aérea.

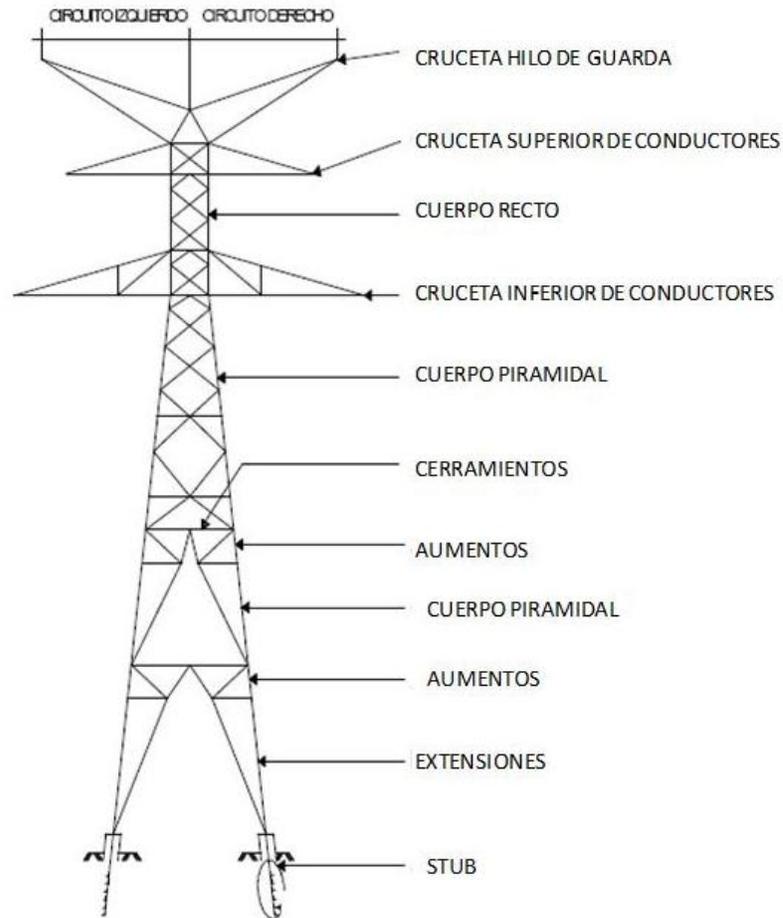
Las líneas de transmisión aérea de alta tensión están compuestas principalmente por tres elementos, los cuales son:

- Cables.- Son los encargados de transmitir la energía eléctrica. Están fabricados con alambres de acero galvanizado cubiertos por alambres de aluminio dispuestos de forma helicoidal.
- Cadenas de aisladores.- Son elementos que sirven para unir los cables conductores a la estructura de la torre.
- Torres de transmisión.- Sistema estructural con elementos que se encargan de sostener los cables que transmiten la energía eléctrica. Se fabrican con perfiles de acero estructural de alta resistencia unidos por medio de tornillos y placas de conexión.

#### 1.2. Componentes y clasificación de las torres de transmisión

Las torres de transmisión tienen la función básica de soportar los cables de conducción eléctrica, así como los cables de guarda, que son los encargados de proteger las líneas de transmisión de las descargas atmosféricas, además de que son también utilizados para la transmisión de voz y datos a través de la fibra óptica.

Las torres de transmisión están compuestas por diferentes componentes, como son: cables de guarda, aisladores, herrajes, crucetas, cuerpo recto, cuerpo piramidal, cerramientos, extensiones y *stub*, que es la parte encargada de unir la superestructura con la cimentación de la torre. Los elementos barra que forman las torres de transmisión son generalmente perfiles de acero estructural. La figura 1 muestra los elementos principales de una torre de transmisión típica.



**Figura 1.1 Elementos de una torre de transmisión**

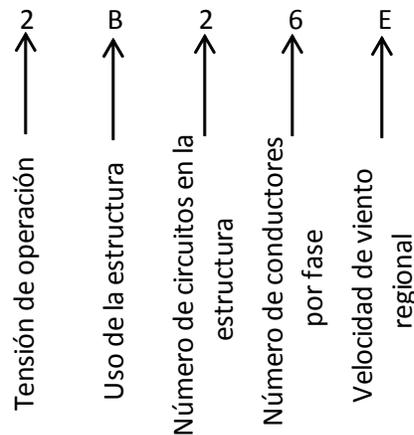
Además, por su posición y función, las torres se pueden clasificar en:

- Torres de suspensión: se encuentran dentro de la línea, no tienen ángulo de deflexión entre torres, su función es la de soportar la carga de los cables y herrajes. Para su diseño se toma en cuenta la carga generada por los cables, herrajes, el peso de la estructura, la caída de cables de la línea y las acciones del viento.
- Torres de deflexión: su función es la de tomar los cambios de dirección (ángulo de deflexión entre torres). Para su diseño se consideran las mismas cargas del caso anterior y las cargas que se generan por los cambios de dirección.
- Torres de remate: se localizan al inicio y al final de la línea de transmisión, por lo que las cargas que la afectan son sólo las de un claro (un lado de la torre).

- Torres de atraque: su función es la de evitar que ante la falla de una o más torres se afecte a más estructuras (torres) a lo largo de la línea.

Las torres de transmisión también se diferencian de acuerdo al tipo de tensión de operación de la línea. En México se tienen líneas de alta tensión de 400, 230 y 161 kV.

La especificación CFE J1000-50 para torres y líneas de transmisión y subtransmisión de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) sugiere clasificar e identificar los distintos tipos de torres de transmisión de acuerdo a una nomenclatura constituida por cinco caracteres alfanuméricos. El siguiente esquema muestra un ejemplo de esta nomenclatura.



**Figura 1.2 Nomenclatura alfanumérica para torres de transmisión (CFE J1000-50)**

Se observa en la figura anterior que el quinto dígito se emplea para identificar la velocidad de viento regional, con un periodo de retorno de 50 años, para la cual ha sido diseñada la torre. La siguiente tabla presenta los casos de velocidad regional empleados en la nomenclatura alfanumérica.

**Tabla 1.1 Casos de velocidad regional empleados en la nomenclatura alfa numérica**

Nomenclatura del quinto dígito	Velocidad regional (km/h)
E	120
F	140
G	160
H	180
I	200

### 1.3 Aspectos para el diseño de torres de transmisión

Algunas definiciones necesarias para el análisis de torres de transmisión y subtransmisión están dadas por la Comisión Federal de Electricidad en la especificación CFE J1000-50 (CFE, 2008). La especificación define las siguientes medidas:

- Claro medio horizontal: es la semisuma de la distancia horizontal de los claros adyacentes a la estructura de referencia.
- Claro vertical: es la suma de las distancias horizontales entre los dos puntos más bajos de las catenarias adyacentes a la estructura.
- Deflexión: es el ángulo máximo de cambio de dirección en la trayectoria de la línea de transmisión, que permite la torre, sin afectar su estabilidad, de acuerdo a su diseño eléctrico y estructural.

Las medidas anteriores son importantes, ya que el claro medio horizontal sirve para calcular las cargas transversales que actúan sobre la estructura debida a la acción del viento sobre los cables, que también es conocido como “claro de viento”. En cuanto al claro vertical, éste sirve para conocer las cargas verticales que actúan sobre la estructura debidas al peso de los cables conductores y cables de guarda, éste es conocido como “claro de peso”.

#### 1.3.1 Requisitos para el diseño de torres de transmisión

##### 1.3.1.1 Velocidad del viento

De acuerdo al Manual de Diseño de Obras Civiles de Diseño por Viento (MOCDV, 2008) de la CFE, la velocidad básica de diseño,  $V_D$ , en km/h, es la velocidad a partir de la cual se determinan los efectos del viento sobre la estructura de soporte, cables y aisladores, y se determina con la siguiente expresión:

$$V_D = F_T F_{rz} V_R \quad (1.1)$$

donde:

$F_T$ : es el factor que depende de la topografía local, adimensional,

$F_{rz}$ : es el factor que toma en cuenta el efecto de las características de exposición local, adimensional,

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

El factor de topografía toma en cuenta el efecto topográfico local del sitio en donde se desplantarán las estructuras en un tramo de la línea de transmisión en estudio. El valor del factor a considerar debe ser 1.0 a menos que se encuentre dentro de las características que se muestran en la tabla siguiente:

**Tabla 1.2 Factores de topografía (MOCDV, 2008)**

Sitios	Topografía	$F_T$
Protegidos	Base de promontorios y faldas de serranías del lado del sotavento	0.8
	Valles cerrados	0.9
Normales	Valle cerrado prácticamente plano, campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menores de 5%.	1.0
Expuestos	Terrenos inclinados con pendientes entre 5% y 10%, valles abiertos y litorales planos.	1.1
	Cimas de promontorios, colinas y montaña, terrenos con pendientes mayores del 10%, cañadas carradas, valles que formen un embudo o cañon e islas.	1.2

El factor de exposición  $F_{rz}$ , es el que establece la variación de la velocidad del viento con la altura, en función de la rugosidad del terreno que se presenta alrededor del tramo de la línea de transmisión en estudio.

Si el tramo de la línea de transmisión cruza por diferentes tipos de terreno se debe seleccionar el que ocasione los efectos más adversos. Los terrenos, de acuerdo a su rugosidad, se clasifican como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 1.3 Categorías del terreno (MOCDV, 2008)**

Categoría	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 de superficies nevadas planas	La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser de 2000m.
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 1.5m a 10m en una longitud mínima de 1500m
3	Terreno cubierto por numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas	Áreas urbanas, suburbanas o cualquier terreno con numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas. El tamaño de las construcciones corresponden al de las casas y viviendas	Las obstrucciones presentan alturas de 3m 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, la que sea mayor.
4	Terreno con numerosas obstrucciones largas, altas y estrechamente espaciadas	Bosques, centros de grandes ciudades y complejos industriales bien desarrollados.	Por lo menos 50% de los edificios tienen una altura mayor de 20m, las obstrucciones miden de 10m a 30m de altura. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser mayor de 400m y/o 10 veces la altura de la construcción.

El factor de exposición  $F_{rz}$ , se obtiene a partir de las siguientes expresiones:

$$F_{rz} = 1.56 \left[ \frac{10}{\delta} \right]^{\alpha} \quad \text{si } z \leq 10m \quad (1.2a)$$

$$F_{rz} = 1.56 \left[ \frac{z}{\delta} \right]^{\alpha} \quad \text{si } 10 < z < \delta \quad (1.2b)$$

$$F_{rz} = 1.56 \quad \text{si } z \geq \delta \quad (1.2c)$$

donde:

$\delta$ : es la altura gradiente, medida a partir del nivel del terreno de desplante; debe estar expresada en metros. Por encima de ésta, la variación de la velocidad el viento no es importante y se puede suponer constante.

$\alpha$ : es un exponente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura, es adimensional.

$z$ : es la altura a la que se requiere determinar la presión, en metros. Normalmente para cables y estructura se define a  $2/3$  de la altura total de la estructura, a menos que las características particulares se indiquen otros valores. La siguiente tabla muestra los parámetros de  $\alpha$  y  $\delta$  en función de la categoría del terreno.

**Tabla 1.4 Valores  $\alpha$  y  $\delta$  que dependen de la rugosidad del terreno**

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

Para las zonas que cruzan la línea de transmisión y subtransmisión se determina la velocidad regional del viento para un periodo de retorno de 10 y 50 años.

De acuerdo al MOCDV (2008) de la CFE, la velocidad regional de ráfaga del viento es la velocidad máxima del viento que puede ser excedida en un cierto periodo de retorno  $T$ , en años, en una zona o región determinada del país. Esta velocidad se determina tomando en cuenta la importancia de la estructura y la localización geográfica del punto de desplante.

Para determinar la velocidad regional asociada a un periodo de retorno fijo se utilizan los mapas de isotacas proporcionados en el MOCDV (2008). Los mapas, mostrados en las figuras 1.3 y 1.4, toman en cuenta condiciones preestablecidas de categoría del terreno 2, velocidades asociadas con ráfagas de 3 segundos, a una altura de 10m.

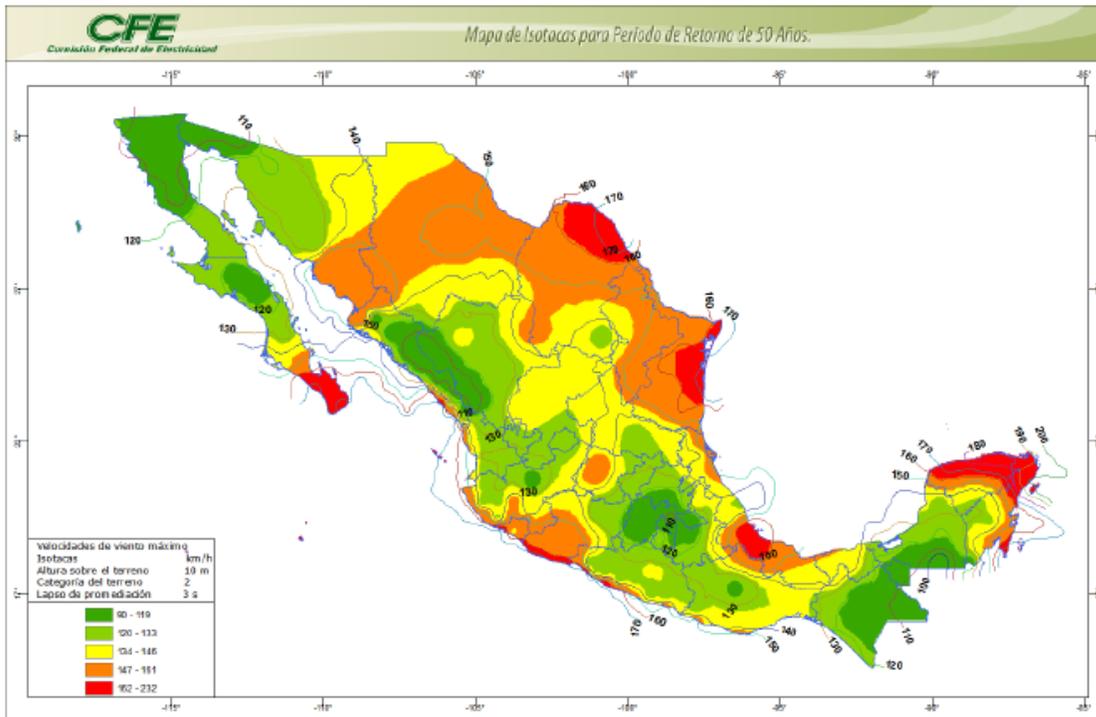


Figura 1.3 Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 50 años (MOCDV, 2008)

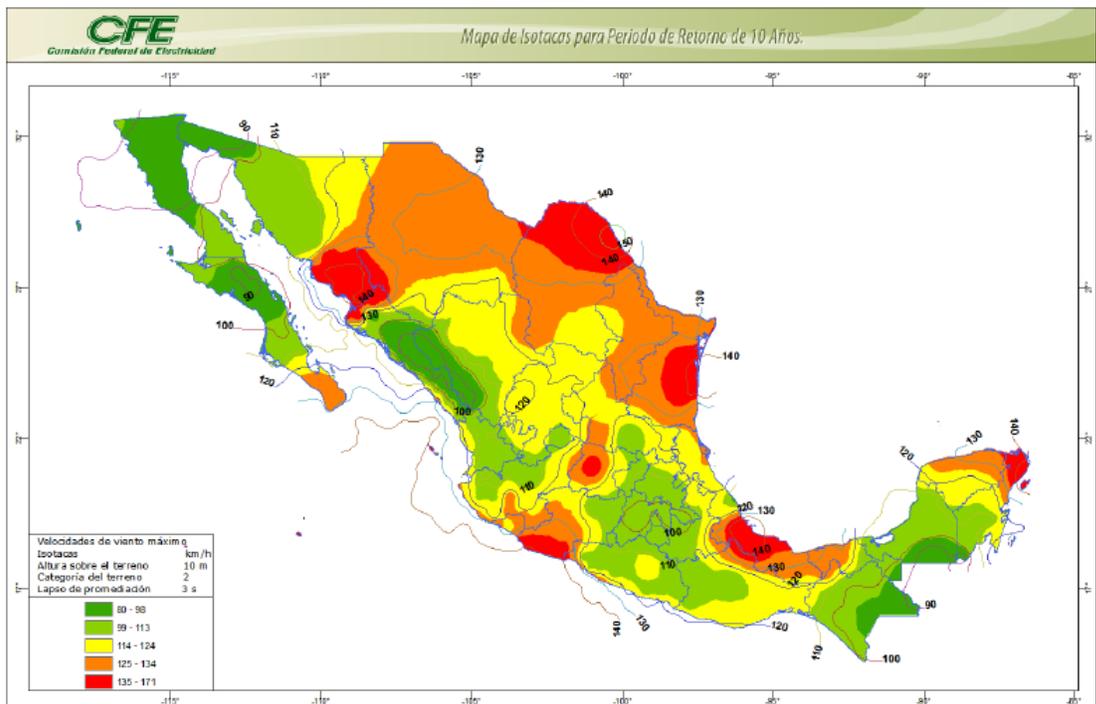


Figura 1.4 Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 10 años (MOCDV, 2008)

Para las torres de transmisión, la velocidad regional de viento máxima (VM) se asocia con un periodo de retorno igual 50 años, y para la velocidad regional reducida (VR) se considera un periodo de retorno de 10 años.

### **1.3.1.2 Determinación de la presión dinámica de base debida al viento en las torres de transmisión**

Las presiones debidas a la acción del viento que se generan sobre superficies de estructuras, varían según la intensidad y la dirección del mismo. La presión dinámica de base,  $q_z$ , es la que ejerce el flujo del viento sobre una superficie perpendicular a ésta y se puede determinar utilizando la siguiente expresión:

$$q_z = 0.0000471 G V_D^2 \quad (1.3)$$

donde:

$G$ : es el factor de corrección por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar, adimensional.

$V_D$ : es la velocidad de diseño, en km/h.

$q_z$ : es la presión dinámica de base a una altura  $z$  sobre el nivel del terreno, en kPa.

El factor 0.0000471 corresponde a la homologación de unidades para obtener la presión en kPa; cabe mencionar que éste toma en cuenta el valor de un medio de la densidad del aire ( $\rho=1.2255 \text{ kg/m}^3$  para  $15^\circ\text{C}$  y al nivel del mar).

El valor del factor de corrección por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar,  $G$ , se obtiene con la siguiente expresión:

$$G = \frac{2.94\Omega}{273 + \tau} \quad (1.4)$$

donde:

$\Omega$ : es la presión barométrica, en kPa.

$\tau$ : es la temperatura ambiente, en  $^\circ\text{C}$ .

La siguiente tabla muestra la presión barométrica,  $\Omega$ , a diferentes altitudes.

**Tabla 1.5 Relación entre altitud y presión barométrica**

<b>Altitud (msnm)</b>	<b>Presión Barométrica (kPa)</b>
<b>0</b>	101.32
<b>500</b>	95.99
<b>1000</b>	89.92
<b>1500</b>	84.66
<b>2000</b>	79.99
<b>2500</b>	75.33
<b>3000</b>	70.66
<b>3500</b>	65.99

Para valores intermedios de altitud se puede interpolar de la tabla anterior para obtener el valor de  $\Omega$ .

### **1.3.1.3 Determinación de la presión del viento sobre las torres de transmisión**

Las presiones del viento que actúan sobre las torres de transmisión se determinan tomando en cuenta los efectos dinámicos del viento. Dichas presiones se obtienen a partir de presiones equivalentes, las cuales emplean factores de respuesta dinámica.

La presión dinámica se puede determinar con la siguiente expresión:

$$P_z = F_g C_a q_z \quad (1.5)$$

donde:

$P_z$ : es la presión dinámica equivalente a la altura  $z$ , que se aplica en forma estática, en kPa.

$F_g$ : es el factor de respuesta dinámica, adimensional.

$C_a$ : es el coeficiente de arrastre de la estructura en la dirección del flujo del viento, adimensional.

$q_z$ : es la presión dinámica de base a una altura  $z$  sobre el nivel del terreno, en metros.

### 1.3.1.4 Factor de respuesta dinámica para torres de transmisión

Este factor se emplea para tomar en cuenta los efectos dinámicos que provoca el viento a partir de la presión estática, y se obtiene con la siguiente expresión:

$$F_g = \frac{1}{g_z^2} \left[ 1 + 12.86\sqrt{K} \left( \frac{10}{h_o} \right)^{\alpha'} \left( \frac{1}{1 + 0.563 \frac{h_o}{L_s}} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (1.6)$$

donde:

$\alpha'$ : es el factor de variación de potencia, se toma en función de la categoría del terreno de la tabla 1.6, adimensional.

$L_s$ : es la escala de turbulencia del viento, se toma en función de la categoría del terreno de la tabla 1.6, en metros.

$K$ : es el factor de rugosidad del terreno, se toma en función de la categoría del terreno de la tabla 1.6, es adimensional.

$h$ : es la altura total de la estructura sobre el nivel del terreno, en metros.

$h_o$ : es la altura de referencia de la estructura, debe tomarse como 2/3 de  $h$ .

**Tabla 1.6 Parámetros empleados en la ecuación (1.6)**

<b>Terreno tipo</b>	<b>K</b>	<b>Ls</b>	<b><math>\alpha'</math></b>
<b>1</b>	0.0030	72.10	0.121
<b>2</b>	0.0065	63.70	0.164
<b>3</b>	0.0142	53.50	0.216
<b>4</b>	0.0318	44.50	0.262

$g_z$ : es el factor de ráfaga, variable según la altura  $z$  y se calcula con la siguiente expresión:

$$g_z = \frac{1 - \left\{ 0.6226 \left[ k \left( \frac{z}{\delta} \right)^\eta - \xi \right]^{1.2716} * \ln \left( \frac{3}{3600} \right) \right\}}{1 - \left\{ 0.6225 \left[ k \left( \frac{z}{\delta} \right)^\eta - \xi \right]^{1.2716} * \ln \left( \frac{600}{3600} \right) \right\}} \quad (1.7)$$

donde  $k$ ,  $\eta$ , y  $\xi$ , son valores adimensionales, dependen de la turbulencia y de la rugosidad del sitio;  $\delta$ , es la altura gradiente en metros. Estos parámetros se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 1.7 Parámetros empleados en la ecuación (1.7)**

	Categoría 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

### 1.3.1.5. Cálculo del coeficiente de arrastre

En placas planas o muros que son normales al flujo del aire, sólo se presenta una fuerza generada por el viento, la que es paralela a la dirección del flujo. Esta fuerza se denomina fuerza de arrastre.

La fuerza de arrastre está definida por las presiones promedio que se presentan en barlovento y sotavento de la placa, y se puede determinar como:

$$F_A = (p_b - p_s)A \quad (1.8)$$

donde:

$F_A$ : es la fuerza de arrastre

$p_b$ : es la presión promedio en barlovento.

$p_s$ : es la presión promedio en sotavento

$A$ : es el área frontal de la placa o muro.

Si dividimos ambos lados de la ecuación (1.8) entre la presión dinámica  $1/2\rho_a U^2 A$ , obtenemos:

$$C_A = C_b + (-C_s) \quad (1.9)$$

De acuerdo a lo anterior, para placas cuadradas los coeficientes de arrastre son iguales a 1.1 y 1.2 para flujo laminar y turbulento, respectivamente.

Para placas rectangulares que tienen una relación alto (h) entre ancho (b) en el intervalo  $1/30 < h/b < 30$ , el valor del coeficiente de arrastre es:

$$C_A = 1.10 + 0.2\left(\frac{h}{b} + \frac{b}{h}\right) \quad (1.10)$$

Cuando en la superficie de la placa o del muro existe porosidad, el arrastre producido en la placa se reduce, debido a que se permite el paso del aire, lo que reduce la diferencia de presión entre la cara frontal y trasera.

Para poder representar esta disminución en el coeficiente de arrastre, se introduce un factor de porosidad  $K_p$ , el cual depende de la solidez de la placa.

La solidez de la placa se puede definir con un factor de solidez,  $\delta$ , el cual está dado por:

$$\delta = \frac{\text{área sólida}}{\text{área total}} \quad (1.11)$$

Para placas impermeables (sin porosidad)  $\delta=1$ .

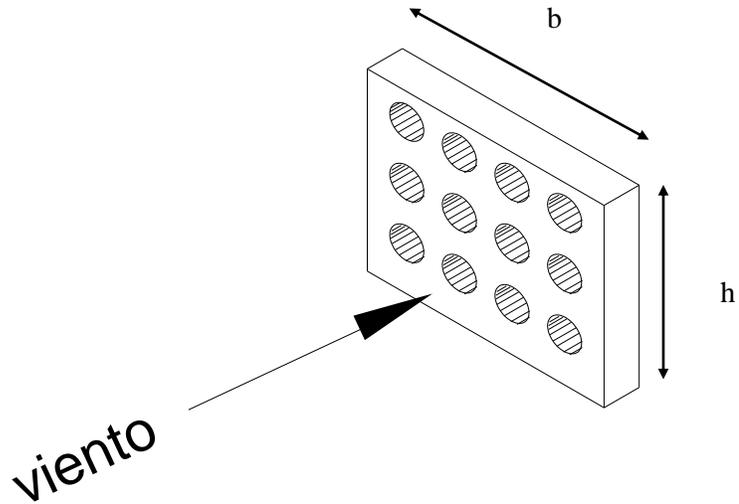
Con base en lo anterior, el factor de porosidad se puede determinar como:

$$K_p \cong 1 - (1 - \delta)^2 \quad (1.12)$$

El coeficiente de arrastre para placas que presentan porosidad será:

$$C_{A\delta} = C_A \cdot K_p \quad (1.13)$$

La siguiente figura muestra una placa porosa sometida al viento.



**Figura 1.5 Placa con porosidad normal al flujo del aire.**

La expresión (1.13) del coeficiente de arrastre es útil, ya que puede ser empleada para estimar el coeficiente de arrastre para armaduras, como es el caso de las torres de transmisión.

De acuerdo a la CFE, el valor del coeficiente de arrastre para cada sección de una estructura formada con celosía de elementos con caras planas se obtiene de la tabla 1.8, y está en función de la relación de solidez,  $\varphi$ , la cual se define como:

$$\varphi = \frac{A_s}{A_t} \quad (1.14)$$

donde:

$A_s$ : es el área sólida total de la cara de la sección considerada de la estructura y expuesta a la acción del viento, en un plano vertical y perpendicular a la dirección del flujo el viento.

$A_t$ : es el área bruta circunscrita por el perímetro de la sección correspondiente, proyectada sobre el plano mencionado.

**Tabla 1.8 Coeficiente de arrastre de torres de celosía con elementos planos**

Relación	C <sub>ae</sub> en sección	
	Cuadrada	Triangular
$\phi < 0.025$	4.00	3.60
$0.025 \leq \phi \leq 0.44$	4.10 - 5.20 $\phi$	3.70 - 4.50 $\phi$
$0.45 \leq \phi \leq 0.69$	1.80	1.70
$0.70 \leq \phi \leq 1.00$	1.30 + 0.70 $\phi$	1.00 + $\phi$

### 1.3.2 Cargas en torres de transmisión

En el diseño de la estructura se deben tomar en cuenta las siguientes cargas:

- Cargas debidas a la masa propia de los componentes de la línea.
- Cargas debidas a eventos climáticos: viento, temperaturas extremas.
- Cargas debidas a las maniobras de tendido durante la construcción.
- Cargas por mantenimiento.

### 1.3.3 Condiciones básicas de carga

Estas condiciones son las que deben ser consideradas para el diseño estructural de las torres de transmisión:

a) Cargas que actúan directamente en la torre:

- Masa propia de la torre, las cadenas de aisladores, herrajes y accesorios.
- Acción del viento sobre la torre, cadenas de aisladores y herrajes.
- Cargas concentradas por tendido.

b) Cargas que transmiten los cables a la torre

- Por la masa propia de los cables que soporta, y en su caso por la masa de hielo que se acumule en los mismos.
- Por la acción del viento que actúa sobre los cables.
- Por tensiones mecánicas en los cables en función de su máximo uso.

Todas las cargas enunciadas anteriormente se denotan mediante literales y se expresan en kN.

La siguiente tabla muestra la nomenclatura empleada.

**Tabla 1.9 Nomenclatura de cargas sobre torres de transmisión**

<b>Nomenclatura</b>	<b>Descripción de la carga</b>
<b>PE</b>	Carga vertical debida a la masa de la torre.
<b>PA</b>	Carga vertical debida a la masa de las cadenas de aisladores, herrajes y accesorios.
<b>PC</b>	Carga vertical debida a la masa de los cables conductores y de guarda.
<b>PCH</b>	Carga vertical debida a la masa de los cables conductores e hilos de guarda y del hielo acumulado en éstos, cuando aplique.
<b>PVM</b>	Carga vertical debida al personal y su equipo respectivo, aplicadas en las combinaciones de carga donde se hacen maniobras de tendido.
<b>PM</b>	Cargas verticales debidas a mantenimiento.
<b>VA</b>	Carga transversal por viento que actúa sobre las cadenas de aisladores y herrajes.
<b>VC</b>	Carga transversal por viento que actúa sobre los cables conductores y de guarda.
<b>VCH</b>	Carga transversal por viento reducido que actúa sobre cables conductores y de guarda en los cuales se ha acumulado hielo.
<b>VE</b>	Carga transversal producida por la acción del viento sobre la torre.
<b>VM</b>	Velocidad regional máxima de viento asociada a un periodo de retorno de 50 años, en km/h.
<b>VR</b>	Velocidad reducida de viento, igual al 50% de la velocidad regional máxima de la zona de la línea para un periodo de retorno de 10 años, en km/h.
<b>TC</b>	Carga debida a la tensión mecánica de los cables, proyectada en las direcciones longitudinal y transversal de la torre.
<b>CL</b>	Componente longitudinal debida a la tensión mecánica del conductor o guarda, aplicada en el punto de sujeción de cables en el que se hace la maniobra de tendido.

### 1.3.4 Combinaciones y factores de carga

En la siguiente tabla se presentan las diferentes combinaciones de carga que deben aplicarse al diseño estructural de las torres de transmisión.

**Tabla 1.10 Combinaciones y factores de carga para condiciones con y sin hielo**

Hipótesis de carga		Combinación de carga	Viento
Normal con viento regional		$(PE + PA + PC + VE + VA + VC + TC) * FCG$	VM
Tendido	Suspensión	$(PE + VE) * FCG + (PA + PC) * FCG + (VA + VC + TC + CL) * 1.18 + PVM$	VR
	Deflexión y remate	$(PE + VE + VA + VC + TC + CL) * FCG + (PA + PC) * FCG + PVM$	VR
Mantenimiento		PM	VR
Normal con viento regional reducido y hielo		$(PE + PA + PCH + VE + VA + VCH + TC) * FCG$	VR

#### 1.3.4.1 Consideraciones básicas para el cálculo de cargas

Las consideraciones básicas presentadas en la Tabla 1.10, que se deben aplicar para el diseño estructural de torres de transmisión, son las siguientes:

- El factor de carga vertical (FCV) en la hipótesis de carga por tendido debe ser:  $FCV=1.5$ .
- El factor de carga global (FCG), para torres de suspensión  $FCG=1.0$ ; para el caso de torres de remate y deflexión  $FCG=1.18$ .
- En las combinaciones de carga en donde se incluye TC, ésta se refiere a las tensiones mecánicas de los cables aplicadas en la dirección de éstos, es decir en la dirección de la línea de transmisión y se deben proyectar siempre en las direcciones longitudinal y transversal de la torre.
- Para la condición de tendido se debe establecer un margen de seguridad adecuado para el personal durante las maniobras. Para fines de diseño en los puntos de sujeción de cables (por fase cada vez) se agregarán además las cargas PVM y CL en el punto donde se considere la maniobra de tendido.

Valores PVM a considerar en la maniobra de tendido son:

- 7 kN para fases de 230 kV y 400 kV
- 5kN para fases de 115 kV,
- 5 kN para cables de guarda.
- Con el fin de dar mantenimiento a las cadenas de aisladores en “V” en las torres de suspensión, se debe considerar una carga vertical concentrada PM, la cual se aplicará en el eje longitudinal de la cruceta o trabe y al centro de la cadena en “V”.

Las cargas verticales que se deben aplicar son las siguientes:

- 3 conductores por fase: 98.07 kN,
- 2 conductores por fase: 65.38kN,
- 1 conductor por fase: 32.69 kN.
- La combinación de carga “normal con viento regional reducido y hielo”, se debe considerar para fines de diseño, un espesor de hielo de 5 mm, con peso específico de 8.8 kN/m<sup>3</sup>.

## Capítulo 2

### Modelación matemática de una torre de transmisión

#### 2.1 Modelación en computadora

El objetivo principal de realizar la modelación de estructuras en computadora es obtener de manera rápida las magnitudes de los desplazamientos, deformaciones y fuerzas en los elementos de la estructura a analizar.

El resultado del análisis de los desplazamientos, deformaciones y esfuerzos, puede ser utilizado para determinar los esfuerzos y deformaciones permisibles de cada elemento.

El diseño de estructuras para determinar las acciones a las que va a estar sujeto cada elemento, generalmente se basa en el empleo de secciones que se consideran efectivas para el problema, o bien se pueden también utilizar las secciones nominales, además de definir las características de los materiales, o tomar características existentes para cada elemento. Cabe mencionar también que para encontrar dichas acciones en los elementos de la estructura, ésta puede ser representada como un sistema aislado, o bien, como un sistema global, pudiendo así obtener la información que se requiere con diferentes niveles de detalle, obteniendo entonces, la resistencia que debe tener cada elemento.

La elaboración de modelos de estructuras existentes, se utiliza principalmente para el análisis y medición de esfuerzos y deformaciones permisibles, tomando como base que se conocen las secciones que conforman los elementos de la estructura, además de algunos detalles del diseño, como son las propiedades de los materiales utilizados, o bien, si es posible, tomar muestras de los materiales que están en la estructura para poder determinar sus características. Los análisis pueden ser realizados para cada elemento de manera individual, para después combinar los efectos en éste y poder finalmente realizar un análisis completo o bien un análisis en subsistemas de la estructura.

Finalmente, en cualquiera de los dos casos, ya sea diseño o revisión de una estructura existente, lo que se puede hacer con los resultados obtenidos del análisis es comparar la demanda y la capacidad de la estructura ante las diferentes acciones a las que se verá sometida.

Dentro del análisis de una estructura, los modelos computacionales se convierten en una herramienta muy útil, lo que facilita la formulación matemática de la geometría y las características del comportamiento de la estructura.

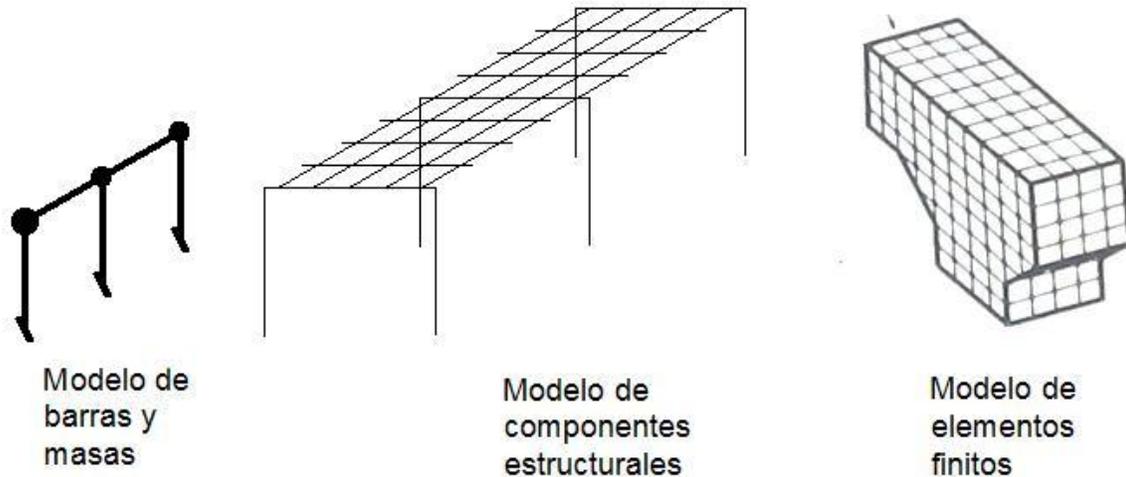
Existen diferentes maneras de representar una estructura en un modelo computacional, desde una representación muy simple hasta una con un modelo muy complejo que represente cada elemento de la estructura con detalle.

Una de las formas más simples de representar una estructura en un modelo computacional es haciendo un modelo de elementos barra, el cual consiste en representar los elementos como un grupo de barras y masas, que se colocan de manera tal, que representan las características principales de la estructura. Para este tipo de modelación se requiere tener los conocimientos necesarios para poder establecer las relaciones matemáticas entre las fuerzas y deformaciones que presente el modelo para poder representar el comportamiento que tendrá la estructura.

Otra forma de representar la estructura es mediante componentes estructurales. Esta representación se basa en la idea de tener subsistemas de la estructura, los cuales se van a conectar por elementos, que no necesariamente forman parte de la estructura, para poder representar así la geometría y comportamiento de ésta, con lo cual podemos obtener para cada subsistema de la estructura las relaciones de fuerza-deformación para cada miembro de interés.

Finalmente, están los modelos de elementos finitos, en los cuales se tiene completamente la geometría de la estructura descrita en un gran número de pequeños elementos, los cuales cuentan con las características de los materiales que se están utilizando en dicha estructura, obteniendo así mayor información acerca de la estructura.

Para poder elegir el tipo de modelo a utilizar es necesario conocer qué tipo de información necesitamos obtener, por ejemplo, el número de reacciones que deseamos conocer a lo largo de la estructura, el nivel de precisión al que deseamos llegar, además de tomar en cuenta aspectos como la importancia de la estructura a analizar y la experiencia de quien realiza el análisis. La siguiente figura muestra algunos ejemplos de modelo de estructuras hechos en computadora.



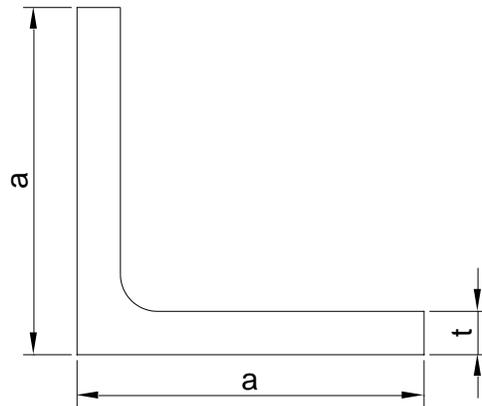
**Figura 2.1 Diferentes formas de representar las estructuras en modelos computacionales**

En la actualidad, existen muchos programas de análisis o de diseño estructural. Uno de estos programas es el programa SAP2000, que es comúnmente empleado en el área de ingeniería estructural para analizar, diseñar o revisar estructuras de acuerdo con diferentes reglamentos, como son: ACI, AISC, EUROCODIGO, etc.

El procedimiento para el desarrollo del modelo incluye la asignación de las propiedades de los materiales, la asignación de distintos tipos de cargas (p.e., peso propio, cargas por viento, sísmicas, térmicas, entre otras) y los análisis. Una vez analizada la estructura, es posible conocer la respuesta en términos de desplazamientos, tensiones, reacciones, entre otras. Además, es posible tener ayuda con el control y la optimización del diseño de los elementos.

## **2.2 Características geométricas de los elementos de las torres de transmisión**

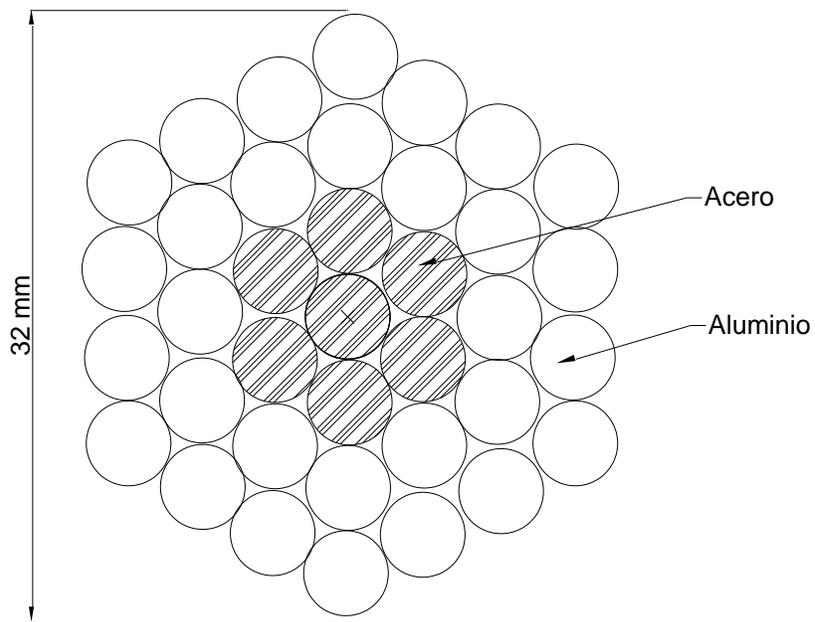
Generalmente las torres de transmisión están formadas por ángulos estructurales de lados iguales (notación LI, de acuerdo al manual IMCA). El tamaño y espesor de los ángulos se determina a partir de las acciones a las cuales va a estar sujeto cada elemento. La siguiente figura muestra un ángulo LI y las dimensiones empleadas para caracterizarlo.



**Figura 2.2 Ángulo de lados iguales**

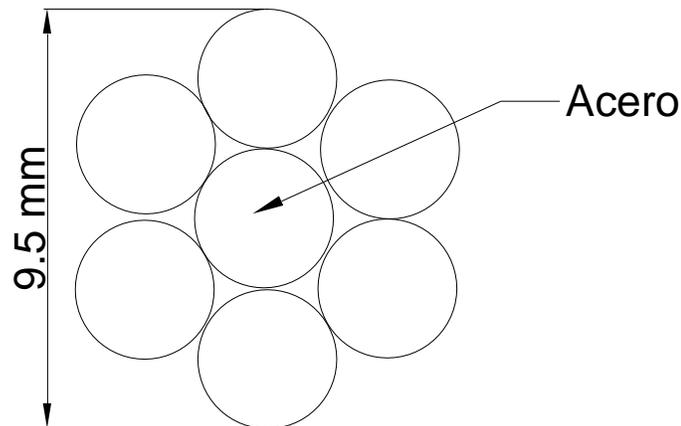
donde  $a$  es el lado del ángulo y  $t$  su espesor.

Otro elemento importante en la torre es el cable conductor. El cable conductor empleado es el “Cable conductor ACSR 1113 Kcm Bluejay”, que tiene un diámetro exterior de 32mm, con 51 hilos. La siguiente figura muestra la sección transversal de un cable conductor.



**Figura 2.3 Sección transversal de un cable conductor**

Además del cable conductor, también se emplean cables de guarda de acero de alta resistencia, con un diámetro exterior de 9.5mm, con 7 hilos de acero.



**Figura 2.4 Sección transversal de un cable de guarda**

### **2.3 Propiedades de los materiales de la torre de transmisión analizada**

Los diferentes perfiles estructurales propuestos para la torre a analizar son de acero estructural con esfuerzo de fluencia igual a  $f_y=3515 \text{ kg/cm}^2$  (acero grado 50). Cabe mencionar que para las torres de transmisión se pueden utilizar diferentes tipos de acero estructural, lo que dependerá de las necesidades que se tengan y del criterio del diseñador.

Para el material de los cables conductores se tomó en cuenta la especificación CFE J1000-50, la cual sugiere que para el “Cable conductor ACSR 1113 Kcm Bluejay”, se considera un peso por unidad de longitud igual a 1.87 kg/cm y una resistencia a la ruptura de 14030 kg. De los 51 hilos con que cuenta este cable, 44 son de aluminio y 7 de acero.

Los cables de guarda tienen un peso propio de 0.406 kg/m, y una resistencia a la ruptura de 4900 kg.

Los aisladores pueden ser de diferentes materiales, como cerámica o vidrio. Para este caso se consideraron aisladores de cerámica con un peso de 8 kg por pieza. La normatividad sugiere emplear 15 piezas por cada conductor para el caso de los conductores de 220 kV.

## 2.4 Modelación de la torre de transmisión

Para la elaboración del modelo de la torre de transmisión se tomaron en cuenta aspectos como el peso propio de los elementos que conforman la torre, el peso propio de los cables conductores y de guarda, así como el peso propio de los herrajes y aisladores.

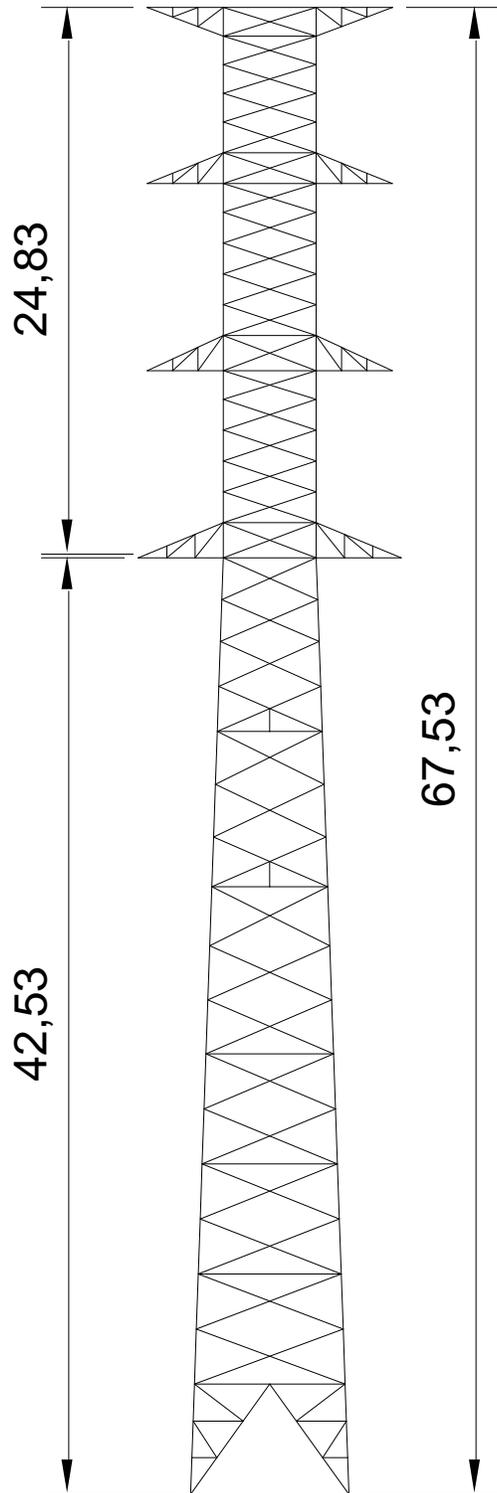
Se elaboraron dos modelos, el primero de éstos es un modelo plano, mientras que el segundo se trata de un modelo tridimensional de la torre.

Para realizar el modelo de la torre de transmisión se tomó como base una torre creada por la Compañía de Luz y Fuerza del Centro, la cual corresponde a una torre 2B26 de acuerdo con la clasificación dada por la especificación CFE J1000-50.

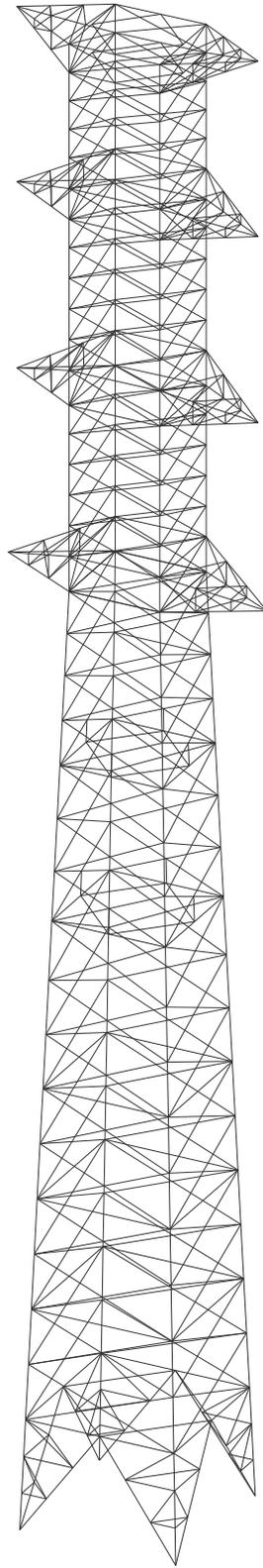
El procedimiento adoptado para la modelación fue el siguiente:

- 1) Se elaboró la geometría de las torres de transmisión (en el plano y en tres dimensiones) con ayuda de AutoCAD, para después exportar la geometría (como elementos barra) al SAP2000.
- 2) Una vez que la geometría se importó, se verificó la orientación de los ejes locales de los elementos y el sistema de unidades a utilizar (en este caso se decidió utilizar unidades del sistema internacional).
- 3) Se definieron las propiedades de los materiales para cada uno de los elementos del modelo.
- 4) Se definieron las secciones de los elementos estructurales empleados en el modelo. Para elegir la sección para cada elemento, se tomaron como referencia los datos de la torre de transmisión 2B26.
- 5) Se asignaron las propiedades de los materiales y las secciones a cada elemento del modelo. También se restringieron los apoyos de la torre (desplazamientos y giros).
- 6) Una vez que se caracterizó por completo la geometría, los materiales y las secciones del modelo, se colocaron las cargas sobre la estructura, inicialmente las cargas por peso propio y cables.

Las siguientes figuras muestran los modelos matemáticos elaborados.



**Figura 2.5 Modelo de la torre de transmisión en el plano**



**Figura 2.6 Modelo de la torre de transmisión en tres dimensiones**

## Capítulo 3

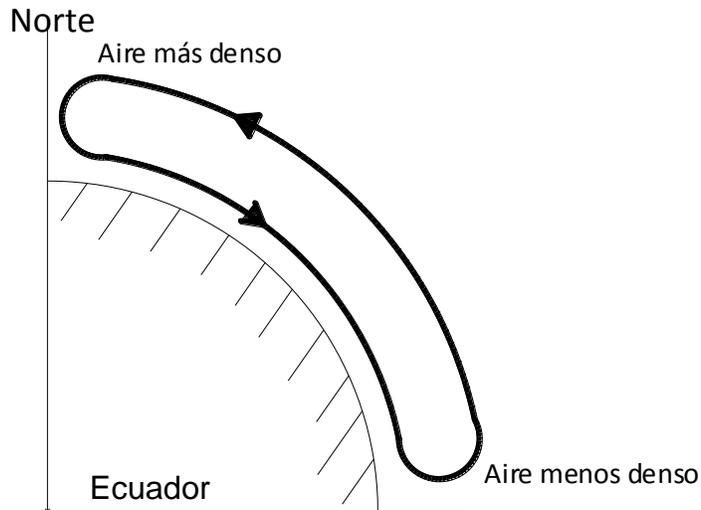
### **Análisis de una torre de transmisión sujeta a efectos de viento de diferentes magnitudes**

#### **3.1 Descripción del fenómeno de viento**

El viento es generado por el desplazamiento de las masas de aire de un punto a otro, estos desplazamientos son causados por los desequilibrios que se producen en la atmósfera debido a que, por el movimiento de rotación del planeta, el Sol no calienta uniformemente la Tierra y la atmósfera.

Lo anterior se complementa al ver que por la forma esférica de la Tierra los rayos solares llegan a los polos con un ángulo de incidencia muy pequeño, de modo tal que en esas regiones la radiación que se recibe es mucho menor que la que se recibe en zonas más cercanas al ecuador, lo que se traduce en que la Tierra y en consecuencia la atmósfera son más calientes en el ecuador que en los polos.

Como el aire en las zonas del ecuador se calienta al recibir la radiación solar, éste se expande debido al aumento de temperatura, mientras que en los polos se contrae. Por lo tanto, el aire es menos denso en el ecuador que en los polos, de modo que la atmósfera tiene mayor espesor en las zonas calientes del planeta que en las frías. A una altitud determinada, la presión ejercida por el aire frío en los polos a esa altitud será menor que la existente en el ecuador a la misma altitud, y debido a que los fluidos se desplazan desde las zonas de alta presión a las de baja, de acuerdo a lo anterior y sin considerar otros efectos, a escala planetaria debería de existir una corriente desde los polos hacia el ecuador, como se ilustra en la Figura 3.1.



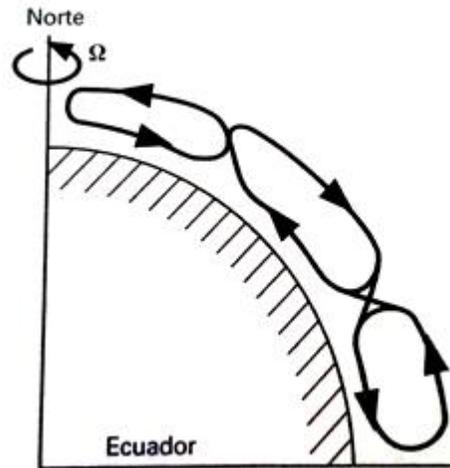
**Figura 3.1 Corriente de aire del ecuador hacia el polo Norte**

Cabe mencionar que si consideramos otros efectos como el movimiento de traslación de la Tierra o el movimiento de rotación, el comportamiento de las masas de aire cambia. Por ejemplo, debido a la fuerza de Coriolis (asociada con la rotación de la Tierra), una partícula de fluido que se mueva desde cualquiera de los polos hacia el ecuador tiende a desviarse hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur.

Debemos también tomar en cuenta que el aire que fluye en las capas altas de la atmósfera desde el ecuador hacia los polos se enfría muy rápidamente, por lo que, debido a ese enfriamiento, la densidad del aire aumenta y comienza a descender, de forma que cuando lleva recorrida aproximadamente un tercio de la distancia entre el ecuador y los polos, este aire frío llega a las capas bajas de la atmósfera.

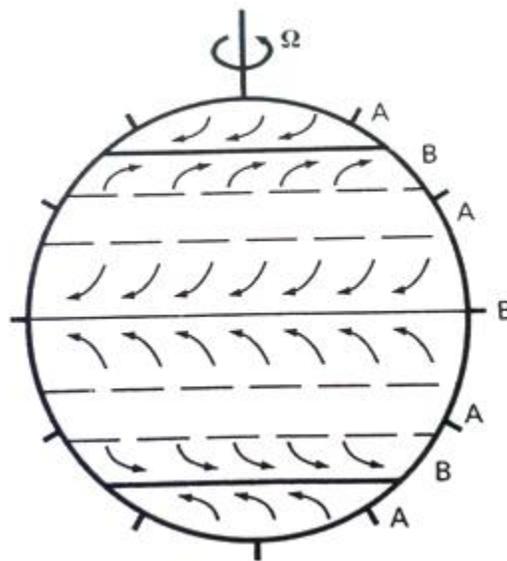
Una parte de este flujo descendente continúa su viaje hacia los polos y la otra parte retorna hacia el ecuador. El aire que sigue hacia los polos disminuye su distancia al eje de rotación de la Tierra, por lo que se generan vientos del Oeste conforme se acerca a los polos, pero el aire que retorna al ecuador sufre el efecto contrario, lo que se traduce en vientos del Este conforme se aleja del eje de rotación.

Considerando todos los efectos que actúan sobre las masas de aire en la Tierra, a escala planetaria podemos ver que el movimiento del aire, de una forma simplificada, está compuesto por tres grandes células de recirculación, como las mostradas en la Figura 3.2.



**Figura 3.2 Células de recirculación por polo**

En la siguiente figura se presenta el régimen global de vientos a baja altura, el cual se caracteriza por una franja en las proximidades del ecuador, en la que los vientos son de intensidades bajas o inexistentes. Cabe mencionar que este régimen de vientos no es útil para determinar el comportamiento del régimen de viento en un lugar determinado.



**Figura 3.3 Régimen global de vientos a baja altura**

Para poder determinar las características del fenómeno de viento atmosférico se han propuesto diferentes parámetros, dentro de los cuales encontramos:

- El viento meteorológico. Este término engloba las condiciones generales del viento medido en condiciones normalizadas, se refiere únicamente a valores promediados en

periodos de al menos diez minutos. El viento meteorológico determina la velocidad de referencia del viento.

- Las condiciones del terreno, principalmente la rugosidad, que afectan al viento incidente, modificando sus propiedades. Por ejemplo, cerca del suelo la velocidad media es menor y la turbulencia mayor.
- La geometría de la estructura, de la cual dependen las cargas aerodinámicas sobre la misma.
- La respuesta mecánica de la estructura.

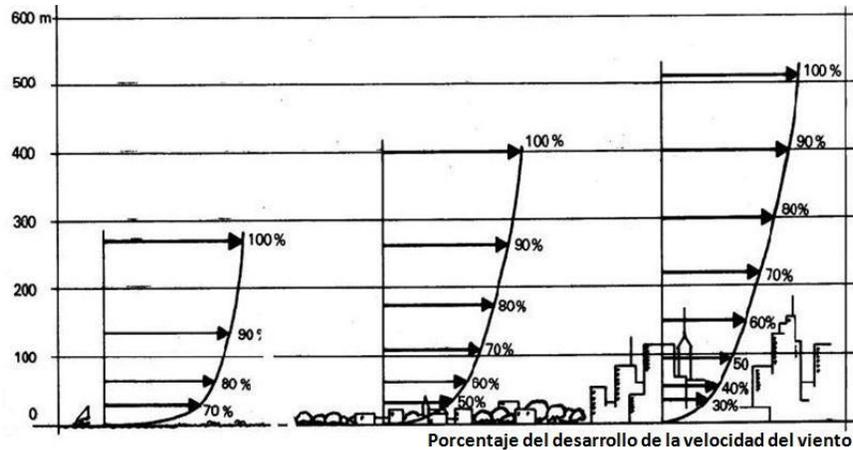
El parámetro más característico del viento es la velocidad, la cual es un valor promediado a lo largo de un periodo de tiempo representativo (usualmente diez minutos), medido a una altura de referencia, generalmente de diez metros, donde se conoce la rugosidad del terreno.

Otro aspecto importante es el periodo de retorno, el cual se asocia con la probabilidad de que durante la vida útil de la estructura se presenten vientos con velocidades superiores a las de diseño.

De todos los movimientos del aire en la atmósfera, los que más nos interesan son los que se presentan cerca de la superficie de la Tierra.

El movimiento del aire cerca del suelo se desarrolla en la capa límite terrestre cuyo espesor está en el orden de los 1000m. En la capa límite terrestre la velocidad media del viento aumenta de forma continua con la altura. Para poder determinar la variación de la altura se han determinado diferentes leyes de variación de la velocidad del viento con la altura, las cuales son utilizadas de acuerdo con la reglamentación que rige en el lugar.

La forma en que aumenta la velocidad del viento depende en gran parte de la topografía y obstáculos que se presentan en el lugar, a continuación se presentan diferentes formas en las que se desarrolla el perfil de la velocidad del viento, de acuerdo al número de obstáculos que se presentan.



**Figura 3.4 Desarrollo de la velocidad del viento con la altura**

Se observa de la figura anterior que conforme existen más obstáculos en el terreno, la velocidad máxima del viento se desarrolla a una mayor altura.

Un aspecto importante que cabe mencionar es que las cargas generadas en las estructuras por el viento son tan importantes que pueden llegar a producir daños iguales o mayores que los generados por sismos, ya que en todo el planeta los fenómenos relacionados con el viento ocurren con mayor frecuencia que los sismos.

### 3.2 Análisis ante carga de viento

Para analizar la torre de transmisión eléctrica se tomó como modelo una torre del tipo 2B26 de 67.53m de altura. Para el análisis de viento, se consideró la presión del viento sobre los elementos de una cara de la torre, y la presión del viento sobre los cables conductores y de guarda. Para determinar dichas presiones se utilizó la metodología mencionada en el capítulo 1.

Cabe mencionar también que de acuerdo al Manual de Obras Civiles de Diseño por Viento (MOCDV, 2008) de la CFE, debido a la importancia de este tipo de estructuras, a las torres de transmisión las podemos clasificar como estructuras pertenecientes al Grupo A, lo que implica que debe de tener un grado de seguridad elevado. En este grupo se consideran las estructuras que al fallar pueden causar la pérdida de de un número importante de vidas o perjuicios económicos, además de las estructuras cuyo funcionamiento es imprescindible y debe continuar después de la ocurrencia de fuertes vientos. También se consideran las

construcciones cuya falla impida la operación de plantas termoeléctricas, hidroeléctricas y nucleares.

### 3.2.1 Parámetros para la determinación de la presión de viento

Se consideran como parámetros para la determinación de las presiones los siguientes:

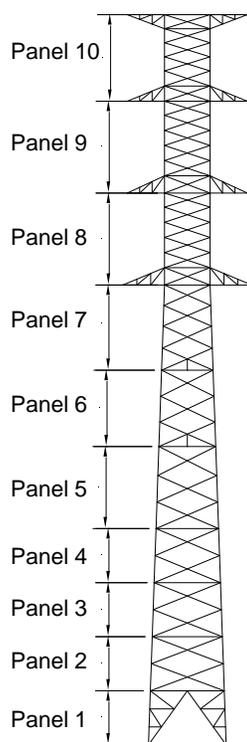
Factor de topografía ( $F_T$ ) igual a 1.1, correspondiente a terrenos inclinados con pendientes entre 5 y 10%, valles abiertos y litorales planos.

Categoría de terreno 2, utilizado para terrenos planos u ondulados con pocas obstrucciones, por lo que los valores de  $\alpha$  y  $\delta$  serán igual a 0.128 y 315, respectivamente.

Además, se supone que la estructura se localiza a una altitud de 35 msnm, por lo que la presión atmosférica será igual a 100.94 kPa, y la temperatura promedio de 27°C.

### 3.2.2 Presión de viento sobre la torre

Para determinar la presión que actúa sobre la torre, ésta se dividió en 10 paneles, para así obtener un resultado de las presiones más cercano a la distribución real de presiones a lo largo de la altura de la torre. La siguiente figura ilustra la división de la estructura en paneles.



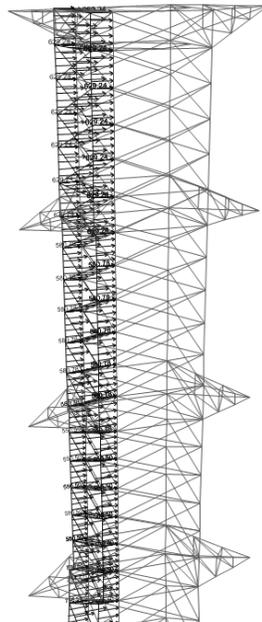
**Figura 3.5 Paneles en que se dividió la torre para su análisis ante cargas generadas por viento**

La siguiente tabla presenta un resumen de los valores de la presión dinámica de base ( $q_z$ ), del factor de ráfaga ( $F_g$ ), de la presión ( $P_z$ ), del área expuesta ( $A$ ) y de la fuerza de arrastre del viento ( $F$ ). Los resultados mostrados en la tabla corresponden a una velocidad regional de viento de 135 km/h.

**Tabla 3.1 Carga de viento sobre la torre de transmisión para una velocidad regional de 135 km/h**

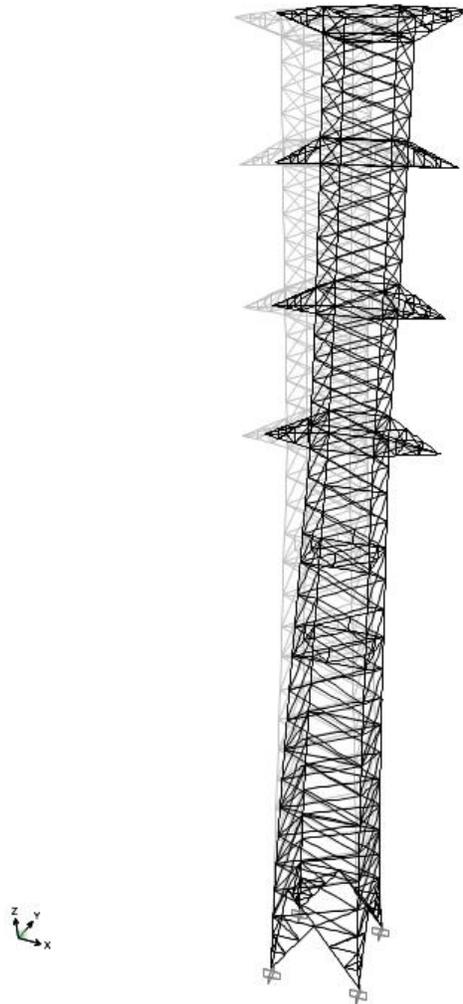
Panel	$q_z$ (kPa)	$F_g$	$P_z$ (kPa)	$A$ (m <sup>2</sup> )	$F$ (kN)
1	0.780	0.835	1.994	4.643	9.259
2	0.987	0.895	2.704	7.062	19.094
3	1.113	0.928	3.160	6.828	21.575
4	1.207	0.950	3.511	6.595	23.159
5	1.308	0.973	3.894	9.233	35.954
6	1.395	0.991	4.231	8.586	36.327
7	1.473	1.007	4.541	9.763	44.329
8	1.546	1.021	4.833	8.979	43.394
9	1.612	1.033	5.098	8.979	45.780
10	1.668	1.043	5.329	9.663	51.498

La siguiente figura ilustra la aplicación de las cargas sobre el modelo matemático.



**Figura 3.6 Cargas por viento aplicadas al modelo**

La siguiente figura muestra la deformada inducida por las cargas de viento.

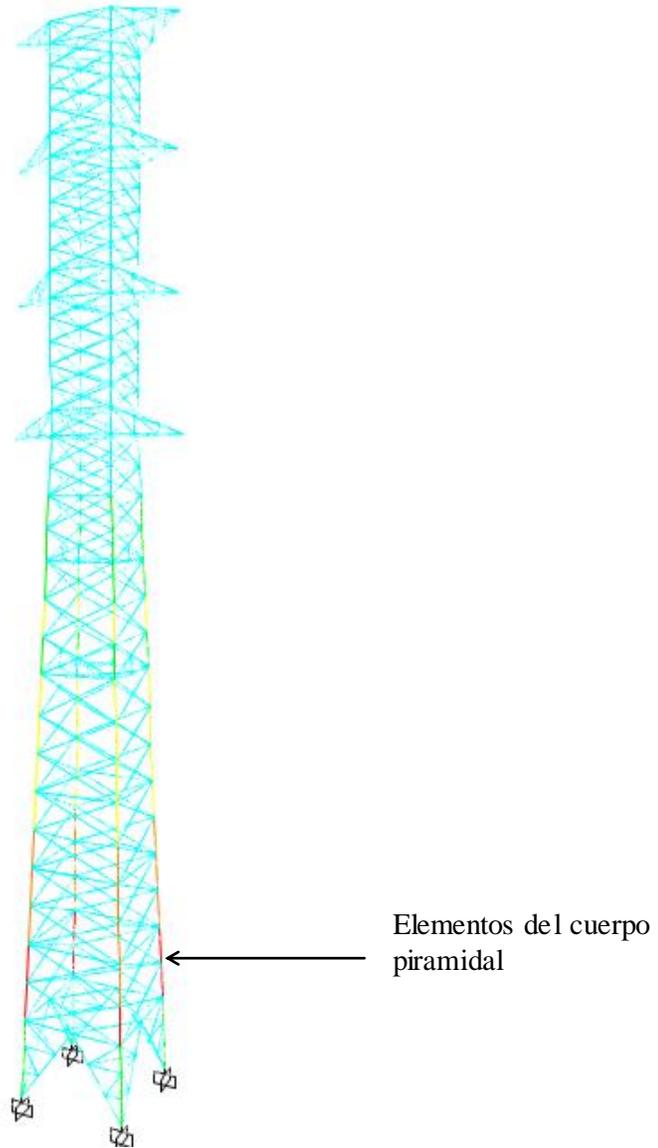


**Figura 3.7 Deformada de la torre ante cargas generadas por viento**

### **3.3 Análisis ante carga muerta**

Para realizar el análisis de la torre ante carga muerta se tomaron en cuenta las cargas generadas por el peso propio de los ángulos que conforman a la torre, el peso propio de los cables conductores y los de guarda, la tensión en los cables y el peso propio de los herrajes y aisladores.

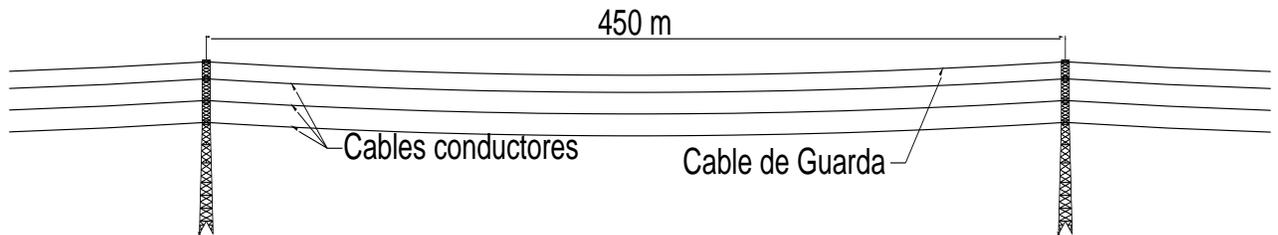
De los análisis realizados con diferentes tamaños de secciones, los elementos que resultan más esforzados son los que se localizan en la parte inferior de la torre, como se ilustra en la Figura 3.8.



**Figura 3.8 Análisis de la torre ante carga muerta**

Cabe mencionar también que la estructura está formada por 786 elementos, por lo que sólo se muestran algunos de los elementos más esforzados para cada uno de los casos analizados

Se considera que el claro que libra la torre en la línea de transmisión eléctrica es de 450m, como se muestra en la Figura 3.9.

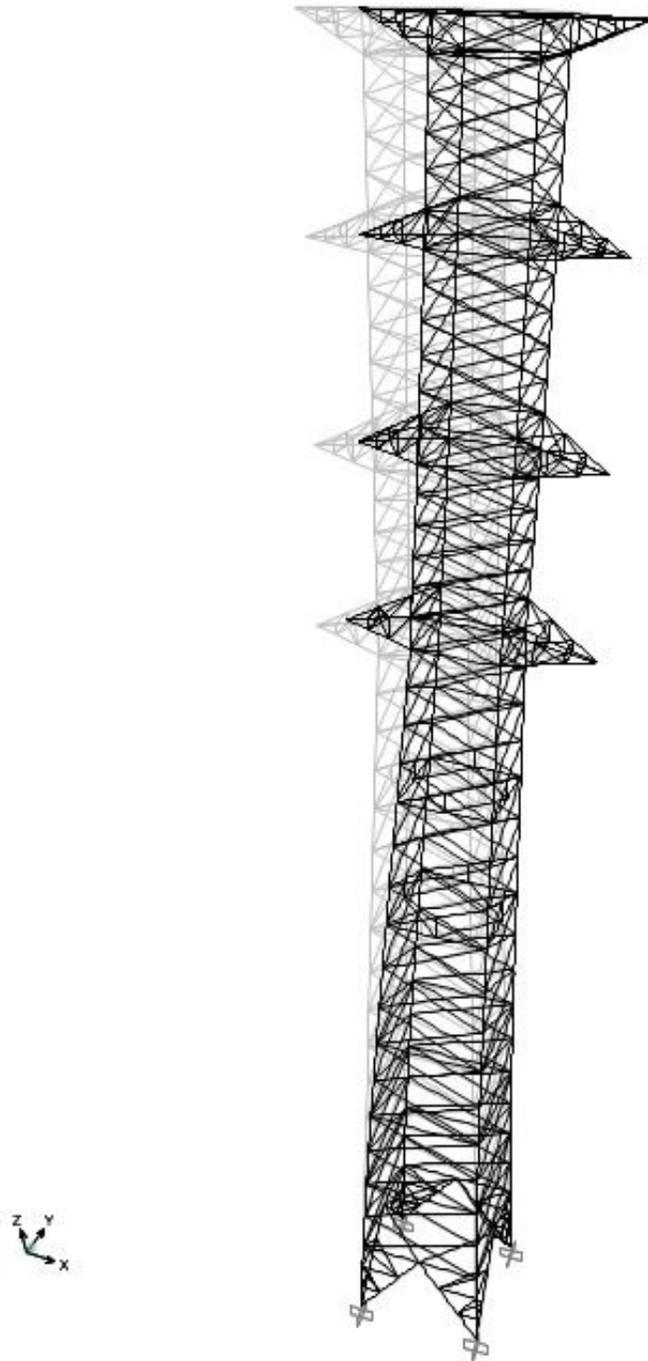


**Figura 3.9 Segmento de la línea de transmisión eléctrica**

### **3.4 Combinación de carga**

Para realizar en análisis se utilizó la combinación de carga definida en la especificación J1000-50 de CFE, la cual considera la carga muerta, la carga generada por el viento sobre la torre y la carga transmitida por los cables conductores y de guarda debida al viento que actúa sobre éstos. Cabe mencionar que el factor de carga utilizado para esta combinación de carga es igual a 1.

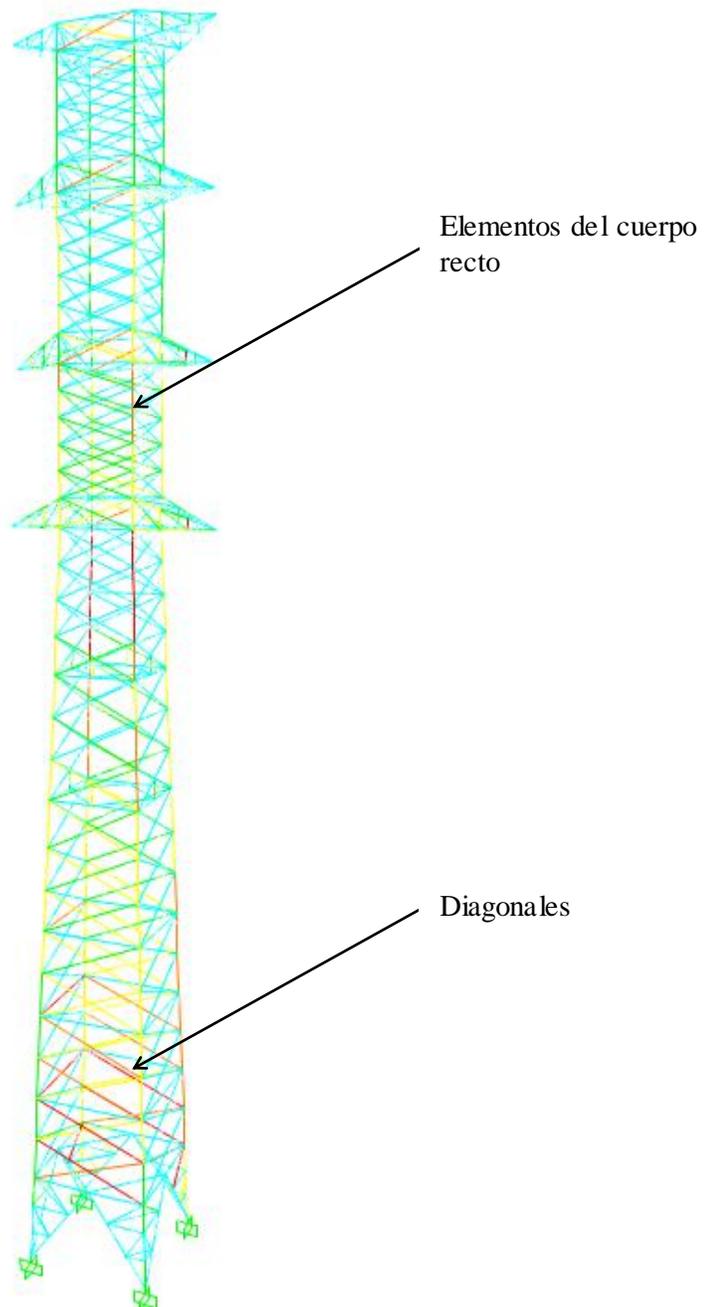
La deformada de la estructura, obtenida a partir de la combinación de carga descrita en el párrafo anterior, se muestra en la Figura 3.10. Se observa que la deformada de la torre se debe predominantemente a las cargas del viento.



**Figura 3.10 Deformada de la torre ante la combinación de la carga de viento, peso propio y de los efectos de los conductores y cables de guarda**

La siguiente figura muestra en color azul los elementos menos esforzados de la torre ante la combinación de carga que considera: carga muerta, viento y el efecto de los conductores en la

torre. Los elementos más esforzados se muestran en color rojo, lo que indica la falla del elemento.



**Figura 3.11. Elementos más y menos esforzados de la torre de transmisión analizada con la combinación de carga**

### **3.5 Comparación y análisis de resultados**

#### **3.5.1 Metodología de análisis para relacionar la velocidad de viento y el costo de la torre**

Para obtener la curva velocidad de viento-costo, se realizaron varios análisis de la torre sometida a cargas generadas por viento de diferente magnitud, con el siguiente procedimiento:

- Se consideró el peso propio de la estructura y los efectos de los cables conductores y de guarda. Adicionalmente, la carga de viento se aplicó sobre la estructura hasta que ésta se encontraba a punto de la falla. Para esta condición, se calculó el peso del material de la torre y se obtuvo el costo. Este costo se relacionó con la velocidad del viento empleada en los análisis.
- Se consideró que al fallar cualquier elemento de la torre de transmisión, era necesario reforzar la misma con elementos de secciones de ángulos iguales de mayores dimensiones, con lo que el peso de la torre aumenta, permitiendo así obtener el costo de la torre. Para el cálculo del costo, no se tomaron en cuenta los costos generados por la mano de obra para la construcción de la misma.

El procedimiento anterior se repitió hasta obtener suficientes puntos (velocidad del viento, costo de la estructura) que definieran una tendencia.

#### **3.5.2 Revisión de los elementos de la torre de transmisión**

Para poder determinar cuáles son los elementos que fallan en la torre ante las diferentes cargas generadas por viento, se empleó el software SAP2000, el cual además de realizar el análisis estructural, nos ayuda a revisar los elementos que sobrepasan los esfuerzos permisibles de acuerdo al material y secciones definidas para cada elemento, e incluso el software puede diseñar los elementos de la estructura.

La revisión y diseño de los elementos lo realiza el SAP2000 con base en el Manual de Diseño para Marcos de Acero AISC 360-05/ IBC 2006. La revisión y el diseño de los elementos de acero consiste en calcular los diferentes esfuerzos generados por carga axial, cortante y flexión, a lo largo de cada elemento, para así comparar los valores calculados con los límites aceptables mediante una relación demanda/capacidad del elemento, la cual no debe exceder el valor de 1.

### 3.5.2.1 Combinaciones de carga para revisión

En este punto cabe mencionar que una estructura debe de ser diseñada de modo tal que su resistencia sea mayor a las cargas aplicadas a ésta, por lo que se deben utilizar ciertas combinaciones de carga utilizando factores de carga para revisar y garantizar que se cumpla lo antes mencionado.

De acuerdo al método LRFD (Load and Resistance Factor Design) se consideran distintos tipos de carga como son: carga muerta (DL), carga viva (LL), carga de viento (WL) y cargas generadas por sismo (EL).

Las combinaciones de carga basadas en el código ASCE 7-05 consideradas para la revisión son las siguientes:

$$0.9DL \pm 1.6WL$$

$$1.2DL \pm 0.8WL$$

$$1.2DL \pm 1.6WL + 1.0LL$$

$$1.2DL \pm 1.0EL$$

$$1.2DL \pm 1.0EL + 1.0LL$$

$$0.9DL \pm 1.0EL$$

### 3.5.2.2 Resistencia de las secciones

Para la revisión de los elementos se consideran las acciones en tensión, compresión, flexión y cortante. Con los valores que se obtienen se puede hacer la comparación de las acciones aplicadas con la resistencia de cada elemento.

#### 3.5.2.2.1 Elementos en tensión

Para elementos sujetos a tensión, se recomienda que la relación de esbeltez no sea mayor que 300. La resistencia a la tensión de diseño y la resistencia permisible a tensión serán respectivamente:

$$\phi_1 P_n \tag{3.1}$$

$$\frac{P_n}{\Omega_t} \tag{3.2}$$

donde:

$\phi_I = 0.90$  (LRFD)

$\Omega_I = 1.67$  (ASD)

El esfuerzo permisible  $P_n = F_y A_g$

### 3.5.2.2.2 Elementos en compresión

Para este caso, la resistencia a compresión de diseño es  $\phi_c P_n$ , y resistencia permisible a compresión es  $\frac{P_n}{\Omega_t}$ , para elementos sujetos a carga axial de compresión.

Los factores de resistencia y seguridad son:

$\phi_I = 0.90$  (LRFD)

$\Omega_I = 1.67$  (ASD)

El esfuerzo nominal a compresión,  $P_n$ , depende de la relación de esbeltez,  $\frac{KL}{r}$ , la cual para este caso no debe de exceder el valor de 200.

Para miembros esbeltos, el esfuerzo nominal a compresión,  $P_n$ , basado en el estado límite de pandeo por flexión está dado por:

$$P_n = F_{cr} \cdot A_g \quad (3.3)$$

donde el esfuerzo de pandeo por flexión,  $F_{cr}$ , se determina con:

$$F_{cr} = \begin{cases} Q \left( 6.058 \frac{Q F_y}{F_e} \right) F_y, & \text{si } F_e \geq 0.44 Q F_y, \\ 0.877 F_e, & \text{si } F_e < 0.44 Q F_y \end{cases} \quad (3.4)$$

donde  $F_e$ , es el esfuerzo crítico de pandeo elástico por estado límite de pandeo por flexión, dado en la siguiente ecuación:

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left( \frac{KL}{r} \right)^2} \quad (3.5)$$

### 3.5.2.2.3 Factor de reducción por esbeltez

El factor de reducción para elementos en compresión esbeltos es calculado con la siguiente expresión:

$$Q = Q_s Q_a \quad (3.6)$$

donde  $Q_s$  y  $Q_a$  depende de la geometría de la sección y de la rigidez de la misma. Los valores de estos factores se determinan de acuerdo a lo establecido en el manual AISC 360-05.

### 3.5.2.2.3 Elementos a flexión

Se consideran elementos sujetos a flexión simple alrededor del eje principal, además que se considera que no existe torsión.

Se considera que la resistencia de diseño a flexión es  $\phi_b M_n$ , y el fuerza permisible a flexión es  $\frac{M_n}{\Omega_b}$ ,

donde los factores de resistencia y seguridad son respectivamente iguales a:

$$\phi_f = 0.90 \text{ (LRFD)}$$

$$\Omega_f = 1.67 \text{ (ASD)}$$

El esfuerzo nominal a flexión para la flexión alrededor del eje principal mayor para el estado límite de pandeo lateral se calcula con:

$$M_n = \begin{cases} \left(0.92 - \frac{0.17M_e}{M_y}\right) M_e, & \text{si } M_e \leq M_y, \quad y \\ \left(0.92 - 1.17 \sqrt{\frac{M_y}{M_e}}\right) M_y \leq 1.5M_y, & \text{si } M_e > M_y, \end{cases} \quad (3.7)$$

donde  $M_e$  es el momento elástico de pandeo lateral que se define para ángulos con lados iguales como:

$$M_e = \frac{0.46Eb^2t^2C_b}{L} \quad (3.8)$$

donde:

$C_b$  es el factor de modificación de pandeo lateral para el diagrama de momento no uniforme.

$L$  es la longitud no arriostrada lateralmente del miembro.

$t$  es el espesor del lado del ángulo.

### 3.5.2.2.4 Cortante en la dirección mayor

El esfuerzo nominal por cortante en la dirección mayor,  $V_{n2}$ , que se calcula de acuerdo a los estados límites de fluencia, se determina como:

$$V_n = 0.6F_y A_w C_v \quad (3.9)$$

donde:

$A_w$  es el área del elemento; para ángulos de lados iguales, es igual a  $bt$ , donde  $b$  es el ancho del lado del ángulo y  $t$  es el espesor del ángulo.

$C_v$  es el coeficiente de cortante en el alma, que para ángulos de lados iguales es igual a 1.0.

### 3.5.3 Presiones en la torre para diferentes paneles

A continuación se presentan las presiones obtenidas para cada panel (ver Figura 3.5), para diferentes velocidades de viento. Se acepta que cuando la velocidad regional es 0 km/h, la presión en todos los paneles es 0 Pa.

**Tabla 3.2 Presiones sobre los paneles de la torre para diferentes velocidades regionales**

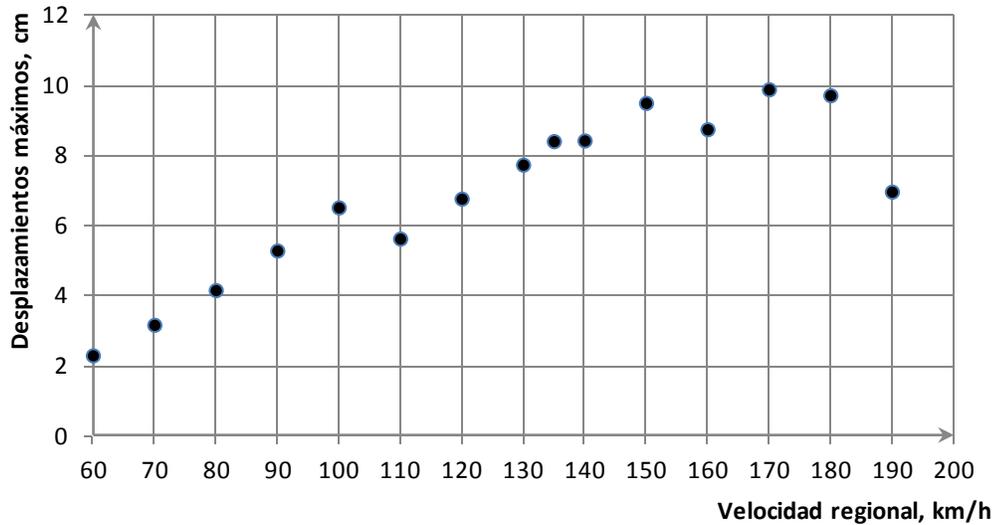
<b>Velocidad</b>								
<b>Regional</b>	<b>60</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>110</b>	<b>120</b>	<b>130</b>
<b>(km/h)</b>								
<b>Panel</b>	<b>Presión (kPa)</b>							
<b>1</b>	0.410	0.558	0.728	0.922	1.138	1.377	1.639	1.923
<b>2</b>	0.555	0.756	0.987	1.250	1.543	1.867	2.222	2.608
<b>3</b>	0.649	0.884	1.154	1.461	1.803	2.182	2.597	3.047
<b>4</b>	0.721	0.982	1.282	1.623	2.004	2.425	2.886	3.386
<b>5</b>	0.800	1.089	1.422	1.800	2.222	2.689	3.200	3.756
<b>6</b>	0.869	1.183	1.545	1.956	2.414	2.921	3.477	4.080
<b>7</b>	0.933	1.270	1.658	2.099	2.591	3.135	3.731	4.379
<b>8</b>	0.993	1.351	1.765	2.234	2.758	3.337	3.971	4.661
<b>9</b>	1.047	1.426	1.862	2.357	2.910	3.521	4.190	4.917
<b>10</b>	1.095	1.490	1.947	2.464	3.041	3.680	4.380	5.140

**Tabla 3.2 (cont.) Presiones sobre los paneles de la torre para diferentes velocidades regionales**

<b>Velocidad</b>							
<b>Regional</b>	<b>135</b>	<b>140</b>	<b>150</b>	<b>160</b>	<b>170</b>	<b>180</b>	<b>190</b>
<b>(km/h)</b>							
<b>Panel</b>	<b>Presión (kPa)</b>						
<b>1</b>	1.994	2.038	2.333	2.655	2.997	3.281	3.655
<b>2</b>	2.704	2.763	3.163	3.599	4.063	4.448	4.956
<b>3</b>	3.160	3.229	3.697	4.206	4.749	5.199	5.792
<b>4</b>	3.511	3.588	4.108	4.674	5.277	5.777	6.437
<b>5</b>	3.894	3.979	4.556	5.184	5.852	6.407	7.138
<b>6</b>	4.231	4.323	4.950	5.632	6.358	6.961	7.756
<b>7</b>	4.541	4.640	5.313	6.045	6.824	7.471	8.324
<b>8</b>	4.833	4.938	5.654	6.433	7.263	7.951	8.859
<b>9</b>	5.098	5.210	5.965	6.787	7.662	8.388	9.346
<b>10</b>	5.329	5.446	6.236	7.095	8.009	8.768	9.770

### **3.5.4 Desplazamientos de la torre por la acción del viento**

Los desplazamientos máximos se presentan en la parte superior de la torre debido a las presiones generadas por el viento. La siguiente figura presenta la variación del desplazamiento en la parte alta de la torre con respecto a la velocidad del viento.



**Figura 3.11 Desplazamientos máximos para cada velocidad regional**

Se observa que los desplazamientos en la torre aumentan conforme aumenta la velocidad regional del viento. La disminución del desplazamiento en algunos puntos a lo largo de la gráfica se debe a que la torre ha sido reforzada en las extensiones del cuerpo piramidal o las extensiones del cuerpo recto de la torre.

Es importante mencionar que las diagonales fueron los elementos que presentaron falla con mayor frecuencia en la torre (ver Figura 3.11).

### 3.5.5 Estimación del peso de la torre

Para determinar el peso de la torre se empleó el software SAP2000, ya que al determinar las características de las secciones y materiales que conforman la estructura se puede obtener el peso de cada elemento, llegando así a obtener el peso total de la estructura.

Debido a que al aumentar la velocidad del viento para cada caso, algún elemento de la torre puede fallar, éste se sustituye por un elemento de sección mayor, aumentando así el peso de la estructura. La siguiente tabla resume el peso obtenido para cada una de las velocidades del viento empleadas.

**Tabla 3.3 Peso de la torre de transmisión de acuerdo a cada velocidad regional de viento**

<b>Velocidad Regional (km/h)</b>	<b>Peso (t)</b>	<b>Velocidad Regional (km/h)</b>	<b>Peso (t)</b>
<b>0</b>	61.830	<b>130</b>	87.026
<b>60</b>	67.601	<b>135</b>	86.164
<b>70</b>	67.601	<b>140</b>	90.199
<b>80</b>	67.601	<b>150</b>	95.645
<b>90</b>	67.601	<b>160</b>	110.272
<b>100</b>	67.601	<b>170</b>	110.272
<b>110</b>	79.144	<b>180</b>	129.997
<b>120</b>	83.145	<b>190</b>	139.033

### **3.5.6 Costo de la torre de transmisión**

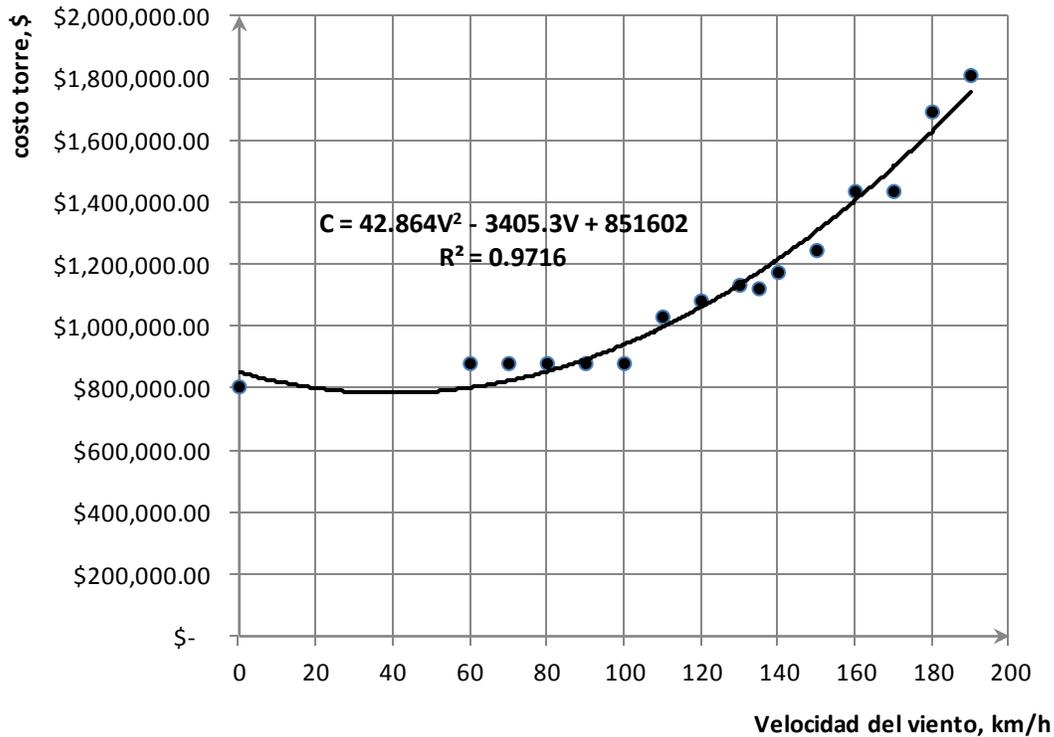
Una vez determinado el peso de la torre, obtenido a partir del refuerzo de la misma debido al aumento de la presión generada por el viento sobre la misma, se puede obtener el costo de la torre.

Para determinar el costo se tomó como referencia el precio del acero estructural proporcionado por la lista de precios de la empresa Aceros Consolidada publicada para el 6 de agosto de 2013, el cual es de \$13,000.00 por tonelada. Cabe mencionar que este precio sólo es del material, es decir, no incluye mano de obra, acarreos ni impuestos. La siguiente tabla presenta el costo de la estructura de la torre y su velocidad regional del viento asociada.

**Tabla 3.4 Costo de la torre para cada velocidad regional de viento**

Velocidad Regional (km/h)	Costo (\$)	Velocidad Regional (km/h)	Costo (\$)
0	\$ 803,795.46	130	\$ 1,131,338.30
60	\$ 878,816.86	135	\$ 1,120,131.60
70	\$ 878,816.86	140	\$ 1,172,592.02
80	\$ 878,816.86	150	\$ 1,243,383.45
90	\$ 878,816.86	160	\$ 1,433,538.62
100	\$ 878,816.86	170	\$ 1,433,538.62
110	\$ 1,028,868.59	180	\$ 1,689,961.20
120	\$ 1,080,883.44	190	\$ 1,807,428.46

La siguiente figura muestra la relación entre la velocidad regional del viento y el costo de la estructura de la torre.



**Figura 3.12 Velocidad regional vs. costo de la torre**

La Figura 3.12 también muestra una línea de tendencia, la cual sirve para ilustrar el comportamiento del costo de la torre (C) conforme la velocidad del viento (V) aumenta. La ecuación que relaciona el costo con la velocidad del viento es:

$$C = 42.864V^2 - 3405.3V + 851602 \quad (3.10)$$

Curvas similares a la anterior fueron empleadas por la CFE para el desarrollo de velocidades óptimas de diseño por viento para el Manual de Obras Civiles para el Diseño por viento (2008).

## Capítulo 4

### Análisis de una torre de transmisión sujeta a efectos de viento generados por una tromba

#### 4.1 Descripción del fenómeno de tromba (downburst)

Este fenómeno es definido como una corriente descendente que provoca fuertes vientos cerca del suelo, lo cual puede causar daños severos a las estructuras en tierra, como las torres de transmisión. El fenómeno se presenta cuando dos corrientes de aire se encuentran en un nivel por arriba del terreno, lo cual provoca un fuerte descenso vertical de aire.

La generación de esta fuerte corriente descendente se presenta en el núcleo de la tormenta, en donde se genera una gran cantidad de granizo y lluvia, los cuales descienden rápidamente al suelo. Debido a la velocidad con la que descienden, arrastran consigo una gran cantidad de aire, el cual, conforme se acerca al suelo gana velocidad, sumado a esto, si el aire que se encuentra debajo de la tormenta tiene una humedad relativa baja y entra a la corriente de aire, generará junto con la lluvia un fenómeno de evaporación, haciendo que el aire se vuelva más pesado, lo que provoca un aumento de velocidad. La siguiente figura muestra un esquema del fenómeno de tromba.

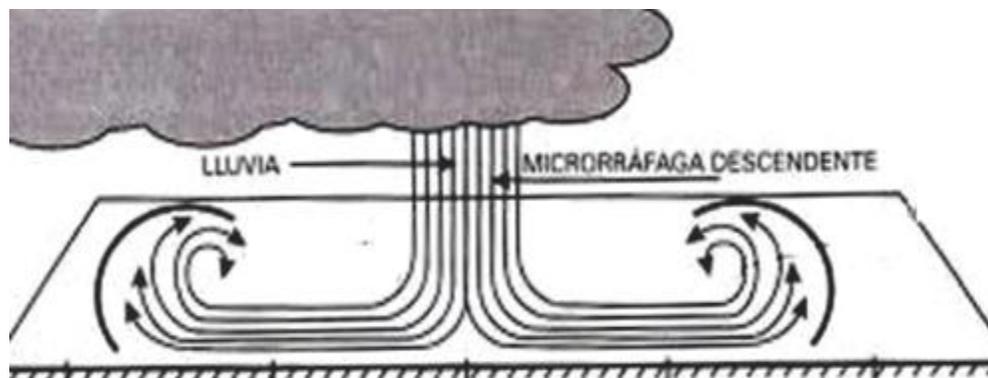
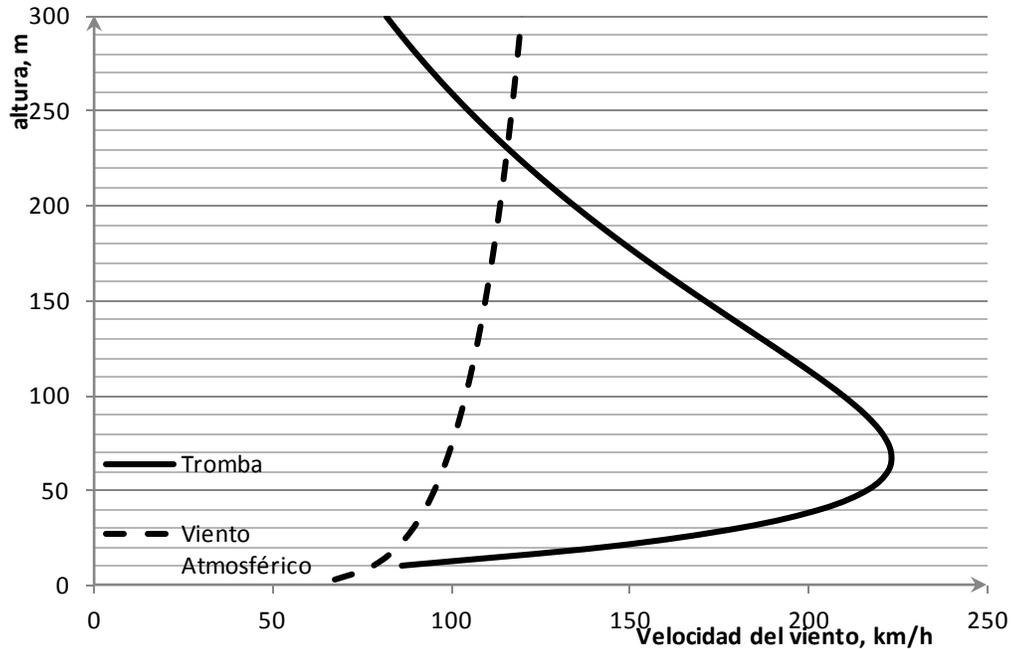


Figura 4.1 Esquema del fenómeno de tromba

Una de las características que distingue a este fenómeno es que su perfil de velocidades difiere notablemente del que se conoce tradicionalmente para el viento atmosférico (ver capítulo 3), teniendo las velocidades más altas a una altura baja, como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 4.2 Distribución de velocidades del viento atmosférico y del viento generado por tromba**

Se tiene registro de que estos fenómenos han causado fallas en muchas torres de líneas de transmisión eléctrica en Australia. Aunado a lo anterior, se ha reportado que este fenómeno ocurre también en países como Estados Unidos, Japón, Sudáfrica, Argentina y México.

Estos fenómenos se pueden dividir en dos tipos, en microbursts cuando los vientos que causan daños tienen una extensión menor a los 4km, y macrobursts cuando estos vientos tienen una extensión mayor a los 4km.

Otra característica de este fenómeno es que la velocidad del viento tiene componentes vertical y horizontal. La velocidad máxima de los vientos generados se encuentra, dependiendo de la magnitud de éste, en un intervalo de 50 a 100m de altura, y a una distancia aproximada de 1.8km desde el centro del chorro, cuando éste tiene un radio de 900m. Con base en lo anterior, se puede establecer que la velocidad máxima del viento se puede obtener a una distancia, medida desde el centro del fenómeno, igual a 1.66 veces el radio del mismo.

La velocidad máxima que se ha registrado en un evento de este tipo fue en la base de la fuerza aérea Andrews, en Maryland en 1983, registrando una velocidad de 67 m/s (241 km/h).

## 4.2 Análisis ante carga de viento por tromba

Se analizó la torre de transmisión de la sección anterior, la cual es de tipo 2B26 con 67.53m de altura, pero esta vez ante los efectos de tromba.

Para el análisis de viento generado por tromba, se consideró la presión del viento sobre los elementos de una cara de la torre, y la presión del viento sobre los cables conductores y de guarda, siguiendo el procedimiento mencionado en el capítulo 1, con la diferencia que las velocidades de diseño son determinadas mediante otro procedimiento, ya que se analiza un fenómeno diferente.

### 4.2.1 Determinación de velocidades para el fenómeno de tromba

Para determinar las velocidades del viento generado por el efecto de tromba o downburst, se empleó el modelo propuesto por Oseguera y Bowles (1988), para una tormenta estacionaria, donde la velocidad está dada por:

$$U = \left( \frac{\lambda R^2}{2r} \right) [1 - e^{-(r/R)^2}] (e^{-Z/z^*} - e^{-Z/\varepsilon}) \quad (4.1)$$

donde:

r: distancia al centro del fenómeno.

R: radio característico del fenómeno.

z\*: altura característica de la capa límite.

ε: altura característica en la capa límite.

λ: factor de escala

Z: altura donde se quiere conocer la velocidad.

Los parámetros empleados para determinar las velocidades para este análisis son los siguientes:

z\*= 200 m

ε= 30 m

λ= 0.25

r= 1.66R

Para el análisis de la torre de transmisión se determinaron las velocidades a dos tercios de la altura de cada panel (ver Figura 3.5).

Para poder variar las velocidades del viento y realizar el análisis, en el modelo utilizado se hace variar el radio de la tromba desde 500 hasta 1450 m. Para este caso, se observó que las velocidades máximas del fenómeno se localizaron entre los 60 y 70 metros de altura.

#### 4.2.2 Determinación de las presiones generadas por el viento debido a la tromba

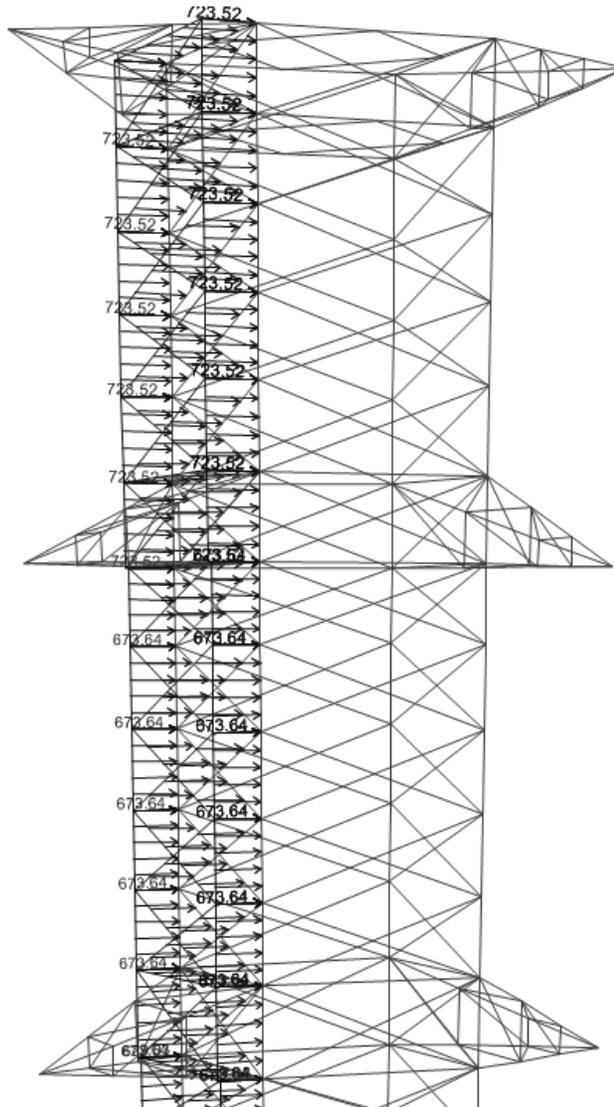
Para la determinación de las presiones generadas por el viento a consecuencia de la tromba sobre la torre de transmisión, se siguió el procedimiento sugerido por la especificación CFE J1000-50 mencionado en el capítulo 1, con la diferencia de que para este caso las velocidades de diseño,  $V_D$ , son ahora las determinadas con el modelo de Oseguera y Bowles (1988), para las alturas determinadas en el análisis anterior, con la misma división de paneles de la estructura.

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos para el análisis considerando una tromba con un diámetro de 2800m, la cual genera una velocidad máxima de 215 km/h.

**Tabla 4.1 Carga de viento generado por tromba sobre torre de transmisión con velocidad máxima de 215 km/h**

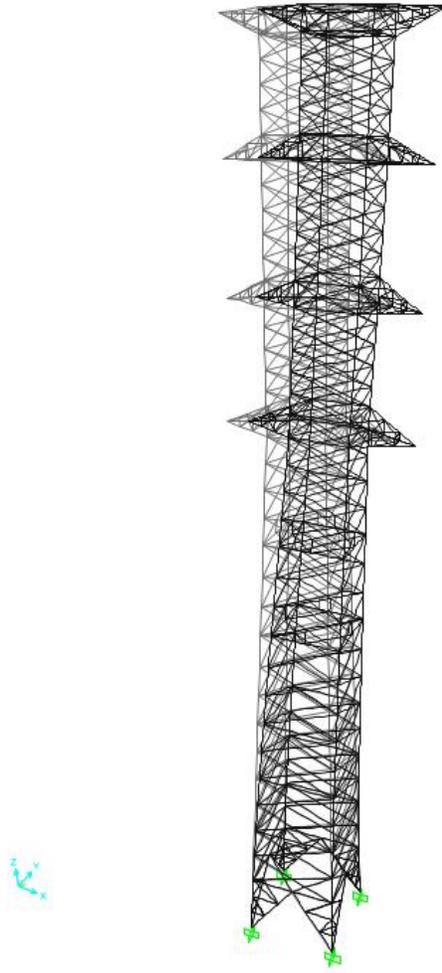
Panel	$q_z$ (kPa)	$F_g$	$P_z$ (kPa)	A (m <sup>2</sup> )	F (kN)
1	0.046	0.835	0.109	4.643	0.504
2	0.238	0.895	0.604	7.062	4.265
3	0.507	0.928	1.332	6.828	9.098
4	0.800	0.950	2.153	6.595	14.200
5	1.178	0.973	3.245	9.233	29.963
6	1.520	0.991	4.267	8.586	36.636
7	1.801	1.007	5.138	9.763	50.159
8	2.006	1.021	5.801	8.548	49.584
9	2.122	1.033	6.212	8.548	53.101
10	2.164	1.043	6.397	9.256	59.214

En la siguiente figura se muestra la aplicación de las cargas en la parte alta de la torre, generadas por la presión del viento inducidas por el fenómeno de tromba, sobre el modelo matemático empleado.



**Figura 4.3 Cargas de viento generadas por tromba aplicadas en una cara del modelo de la torre**

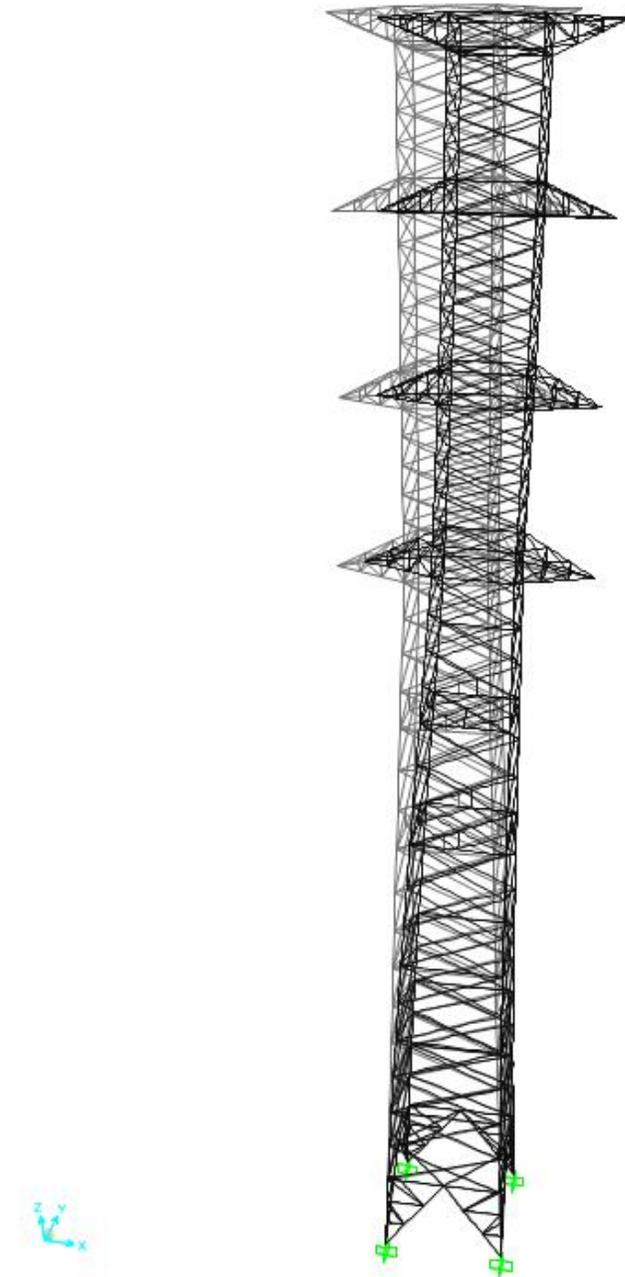
En la siguiente figura se presenta la deformada inducida por las cargas del viento generado por la tromba.



**Figura 4.4 Torre bajo efecto de viento generado por tromba**

### **4.3 Combinación de carga**

Para el análisis por tromba, se empleó la combinación de carga propuesta para viento atmosférico, la cual está definida en la especificación CFE J100-50 (ver capítulo 3). La figura 4.5 muestra la deformada de la torre de transmisión ante la combinación de carga, considerando los efectos de tromba.



**Figura 4.5 Torre bajo efecto de la combinación de carga con viento de tromba**

Se observa de la figura anterior que las cargas que predominan son las inducidas por el viento de tromba. Es importante recalcar que a la carga de viento se suman los efectos que éste provoca en los cables de transmisión y de guarda.

## **4.4 Comparación y análisis de resultados**

### **4.4.1 Metodología de análisis**

Para obtener la curva velocidad de viento-costo, considerando efectos de tromba, se realizaron varios análisis de la torre sometida a distintas cargas inducidas por la tromba, siguiendo el procedimiento presentado en el capítulo 3.

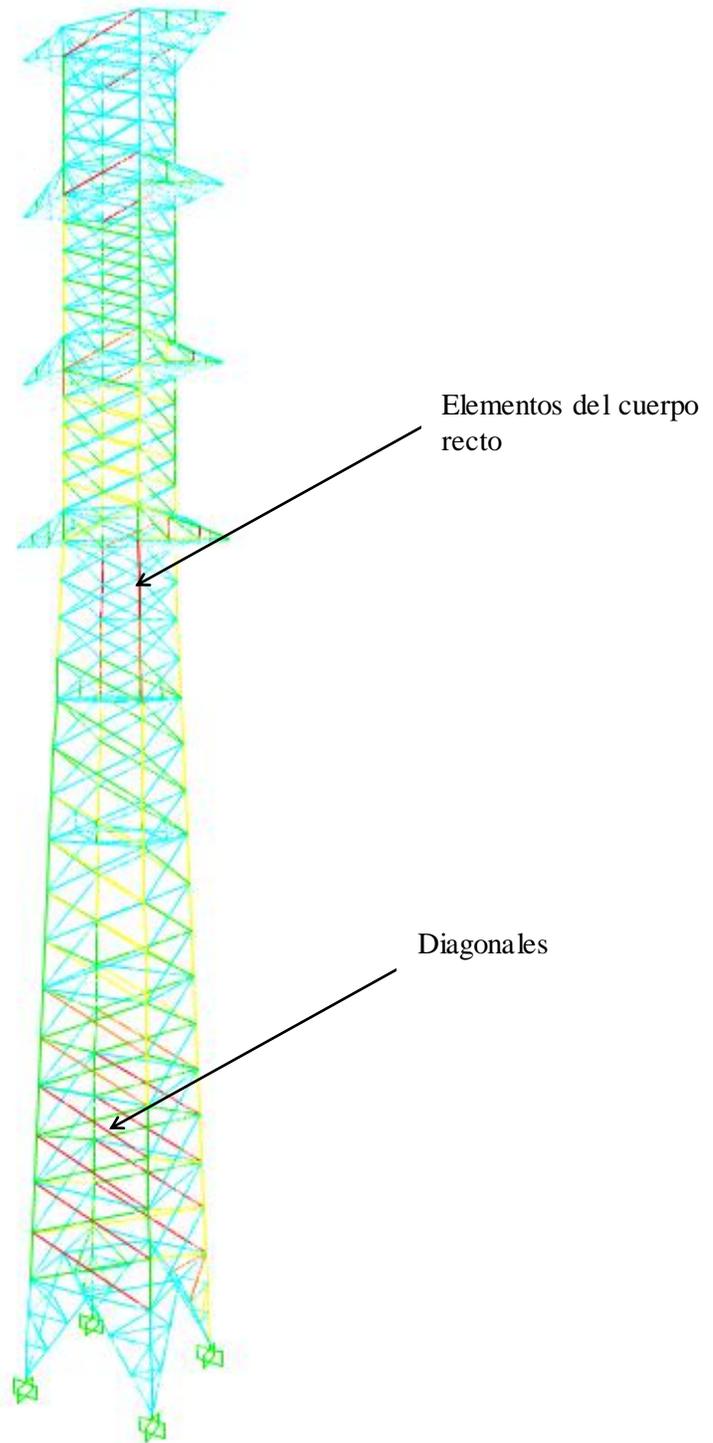
Al igual que en el análisis realizado en el capítulo anterior, se consideró que al fallar cualquier elemento de la torre de transmisión, era necesario reforzar la misma con elementos de secciones de ángulos de lados iguales de mayores dimensiones, lo que incrementa el peso de la torre. Con el peso de la torre se estimó el costo, sin considerar los costos generados por la mano de obra para la construcción de la misma.

### **4.4.2 Revisión de los elementos de la torre de transmisión**

Para revisar estructuralmente cada elemento que conforma la torre de transmisión, y determinar si es necesario reforzar la misma, se empleó el software computacional SAP2000, el cual basa la revisión de elementos en el Manual de Diseño para Marcos de Acero AISC 360-05/ IBC 2006. La revisión y el diseño de los elementos de acero consiste en calcular los diferentes esfuerzos generados por carga axial, cortante y flexión, a lo largo de cada elemento, para así comparar los valores calculados con los límites aceptables mediante una relación demanda/capacidad del elemento, la cual no debe exceder el valor de 1.

Las combinaciones de carga utilizadas y la determinación de la resistencia a compresión, tensión, flexión y cortante se realizan siguiendo el procedimiento mencionado en la sección 3.5.2 de este trabajo.

La figura 4.6 muestra que los elementos que presentaron falla estructural con mayor frecuencia fueron los que forman las diagonales de las crucetas y las extensiones del cuerpo piramidal, aunque también se presentaron fallas en los elementos del cuerpo recto y diagonales de éste.



**Figura 4.6 Elementos de la torre una vez revisados ante la combinación de carga (color rojo indica falla)**

#### 4.4.3 Presión sobre los paneles por viento generado por tromba

A continuación se presentan las presiones obtenidas para cada panel sometido a los efectos de la tromba. Es importante notar que la velocidad del fenómeno depende del radio en el que se extiende el mismo.

**Tabla 4.2 Presiones generadas por viento de tromba sobre los paneles de la torre de transmisión**

Panel	Vel. Máx. del viento de tromba (km/h)									
	76.97	84.67	92.36	100.06	107.76	115.45	123.15	130.85	138.54	146.24
	Presión (kPa)									
1	0.016	0.019	0.022	0.026	0.031	0.035	0.040	0.045	0.050	0.056
2	0.087	0.105	0.125	0.146	0.170	0.195	0.222	0.250	0.280	0.312
3	0.191	0.231	0.275	0.323	0.374	0.430	0.489	0.552	0.619	0.690
4	0.309	0.373	0.444	0.522	0.605	0.694	0.790	0.892	1.000	1.114
5	0.465	0.563	0.670	0.786	0.912	1.047	1.191	1.344	1.507	1.679
6	0.612	0.740	0.881	1.034	1.199	1.376	1.566	1.768	1.982	2.208
7	0.736	0.891	1.061	1.245	1.444	1.657	1.885	2.128	2.386	2.659
8	0.832	1.006	1.197	1.405	1.630	1.871	2.129	2.403	2.694	3.002
9	0.891	1.078	1.282	1.505	1.745	2.004	2.280	2.574	2.885	3.215
10	0.917	1.110	1.320	1.550	1.797	2.063	2.348	2.650	2.971	3.310

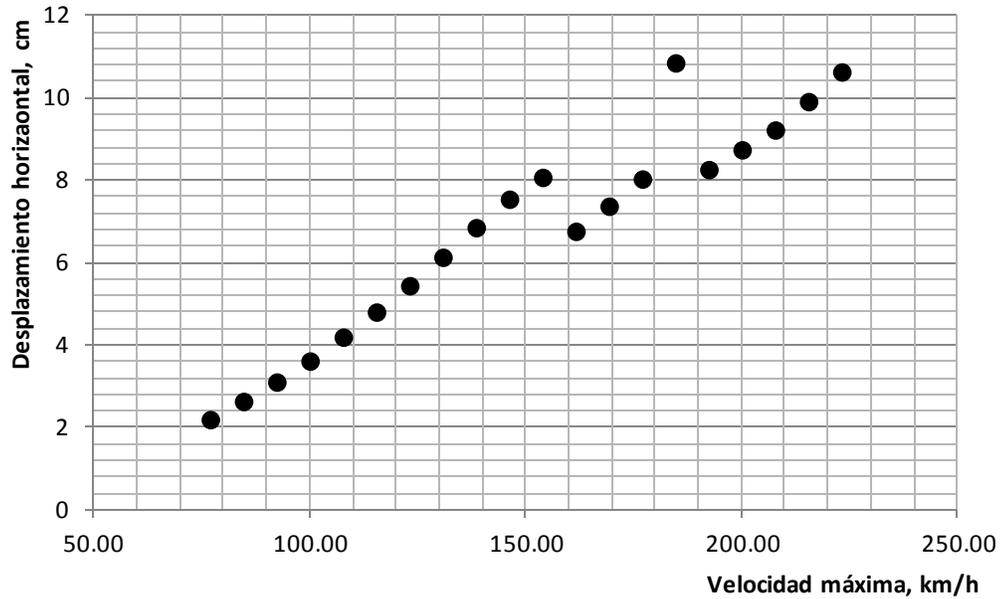
**Tabla 4.2 (cont.). Presiones generadas por viento de tromba sobre los paneles de la torre de transmisión**

<b>Vel. Máx. del viento de tromba (km/h)</b>	<b>153.94</b>	<b>161.63</b>	<b>169.33</b>	<b>177.03</b>	<b>184.73</b>	<b>192.42</b>	<b>200.12</b>	<b>207.82</b>	<b>215.51</b>	<b>223.21</b>
<b>Panel</b>	<b>Presión (kPa)</b>									
<b>1</b>	0.056	0.062	0.066	0.069	0.075	0.082	0.089	0.094	0.101	0.109
<b>2</b>	0.312	0.346	0.367	0.383	0.417	0.454	0.493	0.521	0.562	0.604
<b>3</b>	0.690	0.764	0.810	0.845	0.921	1.002	1.088	1.149	1.239	1.332
<b>4</b>	1.114	1.235	1.309	1.365	1.488	1.620	1.758	1.856	2.002	2.153
<b>5</b>	1.679	1.861	1.972	2.057	2.242	2.442	2.649	2.798	3.018	3.245
<b>6</b>	2.208	2.447	2.593	2.705	2.948	3.210	3.483	3.679	3.968	4.267
<b>7</b>	2.659	2.946	3.123	3.257	3.550	3.866	4.194	4.430	4.777	5.138
<b>8</b>	3.002	3.326	3.526	3.677	4.008	4.365	4.736	5.002	5.394	5.801
<b>9</b>	3.215	3.562	3.776	3.938	4.293	4.674	5.072	5.357	5.777	6.212
<b>10</b>	3.310	3.668	3.888	4.055	4.420	4.813	5.222	5.516	5.948	6.397

Notamos claramente en los datos presentados en la tabla anterior que en las partes más cercanas al suelo, las presiones son relativamente bajas, pero que éstas aumentan significativamente con la altura, típico de las fuerzas inducidas por la tromba.

#### **4.4.4 Desplazamientos horizontales de la torre de transmisión generados por la acción de viento debido a tromba (downburst)**

La siguiente figura muestra los desplazamientos horizontales máximos en la torre de transmisión para diferentes valores de la velocidad máxima de la tromba.



**Figura 4.7 Desplazamientos horizontales máximos para cada intensidad de tromba**

Se observa de la figura anterior que conforme aumenta la velocidad del viento, los desplazamientos aumentan de manera gradual hasta alcanzar un valor aproximado de 8cm, después de este valor se observan discontinuidades en el desplazamiento máximo de la torre, lo anterior se debe a que la torre era reforzada sistemáticamente para evitar la falla de alguno de sus elementos. La variación de los desplazamientos debido al efecto de tromba es diferente a la variación de desplazamiento obtenida ante viento atmosférico.

#### **4.4.5 Estimación del peso de la torre de transmisión bajo efectos de tromba**

Como se mencionó anteriormente, es necesario reforzar los elementos de la torre que fallan por las acciones inducidas por el viento de tromba.

Al reforzar la torre se proponen ángulos de lados iguales de secciones que va aumentando de acuerdo a las necesidades que se tienen, con las características del tamaño y el material de la sección. Con ayuda del software computacional se determinó el peso de la estructura, obteniendo los siguientes resultados.

**Tabla 4.3 Peso de la torre de transmisión para cada velocidad máxima del fenómeno de tromba**

<b>Velocidad Máxima (km/h)</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Velocidad Máxima (km/h)</b>	<b>Peso (kg)</b>
<b>0</b>	61830.42	<b>153.9</b>	77806.19
<b>77.0</b>	67601.30	<b>161.6</b>	78841.06
<b>84.7</b>	67601.30	<b>169.3</b>	78841.06
<b>92.4</b>	67601.30	<b>177.0</b>	78841.06
<b>100.1</b>	67601.30	<b>184.7</b>	105493.85
<b>107.8</b>	67601.30	<b>192.4</b>	105493.85
<b>115.5</b>	67601.30	<b>200.1</b>	105493.85
<b>123.2</b>	67601.30	<b>207.8</b>	106068.55
<b>130.8</b>	67601.30	<b>215.5</b>	106068.55
<b>138.5</b>	67601.30	<b>223.2</b>	106068.55
<b>146.2</b>	69862.63	-	-

#### **4.4.6 Costo de la torre de transmisión**

Con el peso de la torre obtenido, derivado del análisis anterior, es posible determinar su costo, considerando únicamente el precio del acero que lo conforma.

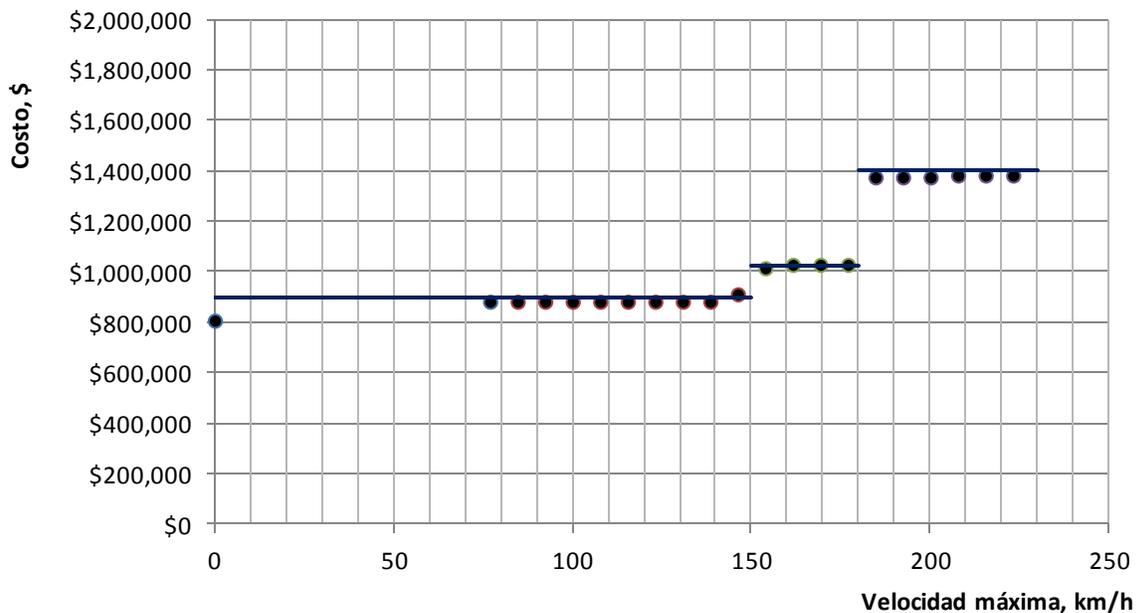
Para determinar el costo se tomó como referencia el precio del acero estructural proporcionado por la lista de precios de la empresa Aceros Consolidada publicada el 6 de agosto de 2013, la cual sugiere un costo de \$13,000.00 por tonelada de acero estructural.

La siguiente tabla resume el costo de la torre asociado con la velocidad de tromba.

**Tabla 4.4 Costo de la torre de transmisión para cada velocidad máxima del fenómeno de tromba**

Velocidad Máxima (km/h)	Costo (\$)	Velocidad Máxima (km/h)	Costo (\$)
0	\$ 803,795.46	153.9	\$ 1,011,480.53
77.0	\$ 878,816.86	161.6	\$ 1,024,933.83
84.7	\$ 878,816.86	169.3	\$ 1,024,933.83
92.4	\$ 878,816.86	177.0	\$ 1,024,933.83
100.1	\$ 878,816.86	184.7	\$ 1,371,419.99
107.8	\$ 878,816.86	192.4	\$ 1,371,419.99
115.5	\$ 878,816.86	200.1	\$ 1,371,419.99
123.2	\$ 878,816.86	207.8	\$ 1,378,891.13
130.8	\$ 878,816.86	215.5	\$ 1,378,891.13
138.5	\$ 878,816.86	223.2	\$ 1,378,891.13
146.2	\$ 908,214.19	-	-

La siguiente figura muestra la relación entre la velocidad máxima del viento generado por una tromba y el costo de la estructura de la torre de transmisión.



**Figura 4.8. Costo de la torre de transmisión vs. velocidad de la tromba**

La figura anterior sugiere que el costo inicial de la estructura ante los efectos de tromba puede considerarse aproximadamente constante en intervalos de velocidades del viento.

Se sugiere emplear la siguiente relación funcional para tomar en cuenta el costo inicial de una torre de transmisión, con características similares a la empleada en este estudio y con trombas similares a las aquí estudiadas:

$$C(V) = \begin{cases} 900,000 & \text{si } 0 \leq V < 150 \\ 1,025,000 & \text{si } 150 \leq V < 180 \\ 1,400,000 & \text{si } 180 \leq V < 220 \end{cases} \quad (4.2)$$

## **Conclusiones y recomendaciones**

### **Conclusiones**

Al analizar la torre de transmisión eléctrica ante los efectos de viento causados por dos fenómenos distintos (viento atmosférico y tromba), se logró obtener una relación entre el costo de una torre de transmisión y la velocidad del viento.

También se observó que los fenómenos de viento considerados son muy diferentes en su comportamiento, por lo que las relaciones entre costo y velocidad del viento obtenidas son igualmente distintas. Un aspecto a resaltar es que estas relaciones no se ajustan con las propuestas por el Manual de Diseño de Obras Civiles de Diseño por Viento (MOCDV, 2008) de la CFE, para obtener el diseño óptimo por cargas de viento.

Un aspecto interesante que se observó fue que a pesar de que la torre presenta menores desplazamientos laterales bajo efectos del viento atmosférico, ésta tiene un costo mayor conforme aumenta la velocidad regional, en cambio, bajo los efectos del viento generado por el fenómeno de tromba, los desplazamientos laterales resultaron ser menores y con ello el costo de la torre, a pesar de que las velocidades máximas que se presentan en el viento generado por tromba son mayores que las que se presentan bajo viento atmosférico.

El que la torre analizada bajo el fenómeno de tromba halla resultado tener menores daños, a pesar de presentar velocidades de diseño más altas que la analizada bajo viento atmosférico, se debe principalmente a la distribución de velocidades del viento con la altura de la tromba, ya que éste aumenta de manera repentina hasta llegar a un máximo para después disminuir, contrario a lo que sucede con el perfil de velocidad del viento atmosférico, en donde la velocidad del viento aumenta conforme aumenta la altura.

Los elementos que fallaron con mayor frecuencia en la torre bajo el efecto de viento atmosférico fueron las diagonales y los elementos que conforman las crucetas. En el análisis del efecto de tromba, los elementos que fallaron fueron sólo las diagonales del cuerpo recto de la torre y los elementos de las crucetas.

## **Recomendaciones**

Se recomienda ampliar el análisis de este tipo de estructuras bajo ambos efectos de viento, en especial para torres de transmisión eléctrica que tiene funciones diferentes, como las torres de deflexión o de retenidas, ya que las cargas generadas por los cables de transmisión y de guarda que actúan en ellas son diferentes.

Es conveniente también revisar el análisis bajo efectos de tromba haciendo variar las condiciones atmosféricas, ya que la velocidad del viento depende de éstos parámetros, proponiendo para cada análisis las condiciones meteorológicas predominantes en el sitio donde se tiene o se pretende tener la estructura, además que se podrían utilizar diferentes modelos matemáticos para representar el fenómeno.

También es conveniente ampliar el estudio del fenómeno de tromba para poder determinar con mayor precisión todos los efectos que se pueden tener derivado de la presencia de este fenómeno.

## Referencias y bibliografía

American Society of Civil Engineers, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, Estados Unidos, 2003.

Comisión Federal de Electricidad, *Torres para Líneas de Transmisión y Subtransmisión Especificación CFE J1000-50*, México, 2011.

Computers and Structures, Inc., *Steel Frame Design Manual AISC 360-05 / IBC 2006 For SAP2000®*, Estados Unidos, 2011.

Hernández Rosas A., Morales Padilla F., *Diseño de Torres de Transmisión Eléctrica*, Tesis de Licenciatura, IPN, 2005.

Holmes J.D., *Wind Loading of Structures*, Taylor & Francis, segunda edición, Estados Unidos 2007.

Holmes, J.D., Oliver, S.D. (1998), *An empirical model of a downburst*, Dept. of Mechanical Engineering Monash University, Australia.

Instituto de Investigaciones Eléctricas, Comisión Federal de Electricidad, *Manual de Diseño de Obras Civiles – Diseño por Viento*, CFE, México, 2008.

Lista de precios, Acero Consolidada, México, vigente a partir del 6 de agosto de 2013.

Meseguer Ruiz J., Sanz Andrés Á., *Aerodinámica Civil Cargas de viento en las edificaciones*, Instituto Universitario <Ignacio Da Riva> IDR/UPM ETIS Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2001.

Morales Hernández, Roger, *Efectos Dinámicos Generados en Torres de Transmisión por Ruptura de Cables*, Tesis de Maestría, UNAM, 2008.

Oldani, J., *La Meteorología*, Editorial De Vecchi, España, 2007.

Oseguera R.M., Bowles R.L., “*A simple analytic 3-dimensional downburst model based on boundary layer stagnation flow*”, NASA Technical Memorandum 100632, Estados Unidos, 1988.

Priestley M.J.N., Seible F., Calvi G.M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons Inc., Estados Unidos, 1996.

Wei-Lian Qu, Bai-Feng Ji, Jin-Wen Wang, *Numerical Analysis of factors influencing the downbursts wind profiles*, The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, November 8-12, 2009, Taipei, Taiwan.

### **Páginas Web Consultadas**

<http://www.crh.noaa.gov/lmk/?n=downburst>; National Weather Service Weather Forecast Office  
Louisville, KY

## Anexo 1

El análisis de la torre se realizó bajo la hipótesis de carga: “Normal con viento regional”, la cual está definida en las combinaciones de carga establecidas en la especificación CFE J1000-50. De acuerdo con la especificación, se deben tomar en cuenta diferentes cargas sobre la torre de transmisión, incluido el peso de los conductores y cables de aguada, además de los efectos del viento sobre los cables (conductores y de guarda).

De acuerdo a la especificación antes mencionada, las cargas generadas por los efectos del viento en los cables se deben de aplicar de manera estática a la torre.

Para poder determinar estas fuerzas fue necesario realizar el análisis de cada conductor de manera independiente, para la determinación de las presiones que actúan sobre los conductores y cable de guarda, se utilizó un método similar al que se utiliza para determinar las presiones del viento sobre la torre, el cual se indica en la misma norma de referencia.

Los parámetros para determinar las presiones sobre los conductores se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla A1. Parámetros para determinar las presiones sobre los conductores**

$V_R$ (km/h)	$F_T$	Categoría del Terreno	$\alpha$	$\delta$	$\Omega$ (kPa)	$\tau$ (°C)	Z (msnm)	G
135	1.1	2	0.128	315	100.94	27	35	0.989

Con base en los parámetros de la tabla anterior y con ayuda de la ecuación 1.3 (ver capítulo 1), la siguiente tabla presenta la presión dinámica de base para cada cable conductor.

**Tabla A2. Presión dinámica de base para los cables conductores**

Cable	z (m)	$F_{rz}$	$V_D$	$q_z$ (kPa)
Conductor 1	28.35	1.146	170.216	1.350
Conductor 2	34.02	1.173	174.233	1.414
Conductor 3	39.69	1.197	177.703	1.471
Guarda	45.02	1.216	180.594	1.520

De acuerdo a la especificación empleada, el coeficiente de arrastre para conductores y cables de guarda es igual a 1.

Para la determinación de la presión dinámica sobre los cables, es necesario tomar en cuenta el factor de respuesta dinámica de los cables, el cual está dado por:

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

donde:

$\alpha'$  = es el factor de variación de potencia, se toma en función de la categoría del terreno de la tabla 1.6, adimensional.

$g_z$  = es el factor de ráfaga, para convertir velocidades de un tiempo de promediación de 3 segundos a un tiempo de 10 minutos.

$L_s$  = es la escala de turbulencia del viento, se toma en función de la categoría del terreno de la tabla 1.6, en metros.

$K$  = es el factor de rugosidad del terreno, se toma en función de la categoría del terreno de la tabla 1.6, es adimensional.

$L$  = es el claro libre entre apoyos del tramos en consideración, en metros.

La presión sobre los cables, amplificada con el factor de respuesta dinámica, se presenta en la siguiente tabla.

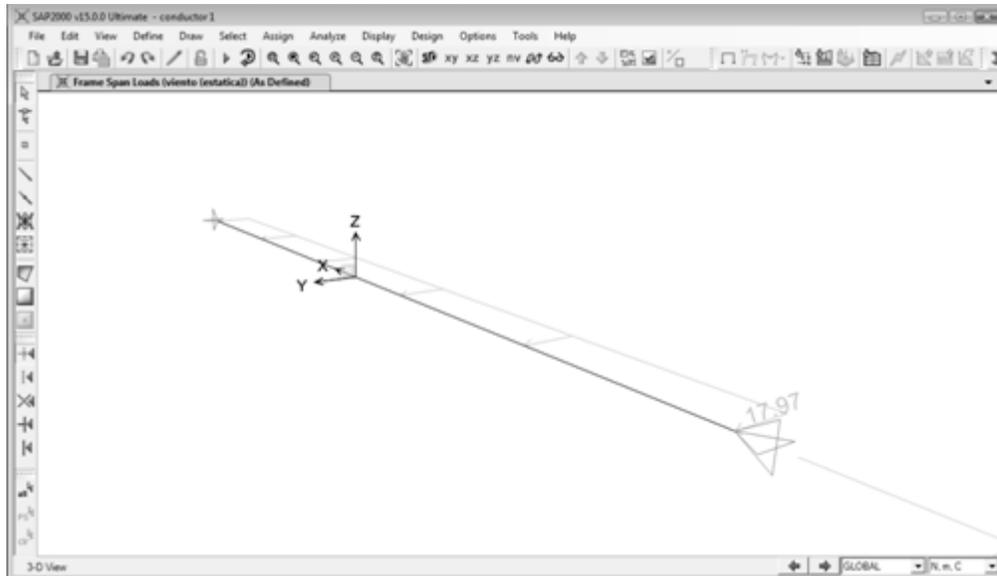
**Tabla A3. Determinación de la presión dinámica actuante en los cables**

Cable	z (m)	q <sub>z</sub> (kPa)	F <sub>gc</sub>	P <sub>z</sub> (kPa)
Conductor 1	28.35	1.350	0.780	0.632
Conductor 2	34.02	1.414	0.785	0.666
Conductor 3	39.69	1.471	0.789	0.696
Guarda	45.02	1.520	0.792	0.722

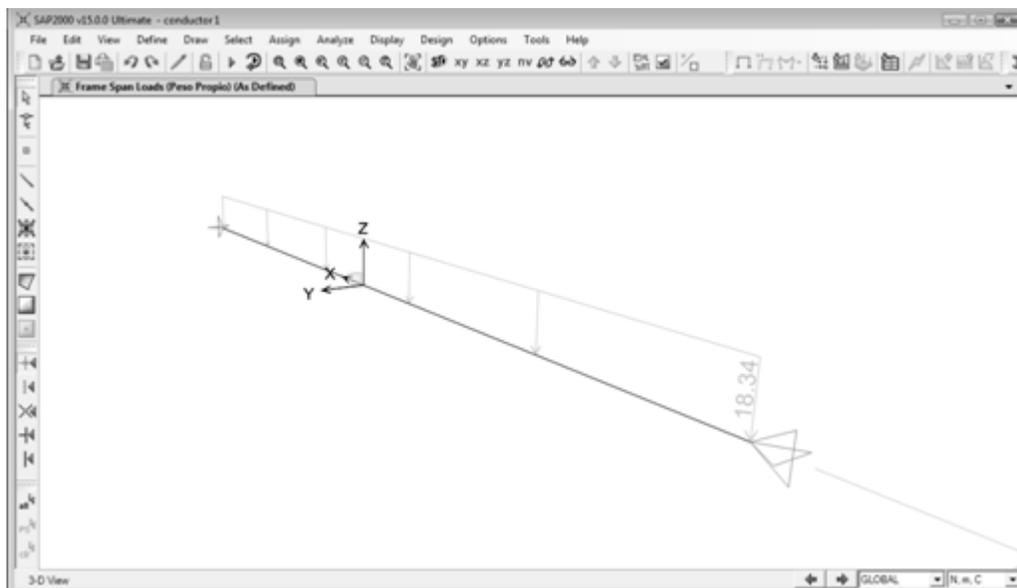
Una vez determinadas las presiones que actúan sobre cada cable, se realizó el análisis en SAP2000 para determinar las acciones que se deben tomar en cuenta sobre la torre debido al efecto de los cables.

Para modelar el cable, éste se fijó en sus extremos, se tomó en cuenta el peso propio y la presión inducida por el viento se aplicó como una carga uniformemente distribuida a lo largo

del cable. Las siguientes figuras muestran el modelo matemático del cable y la forma en que se cargó.

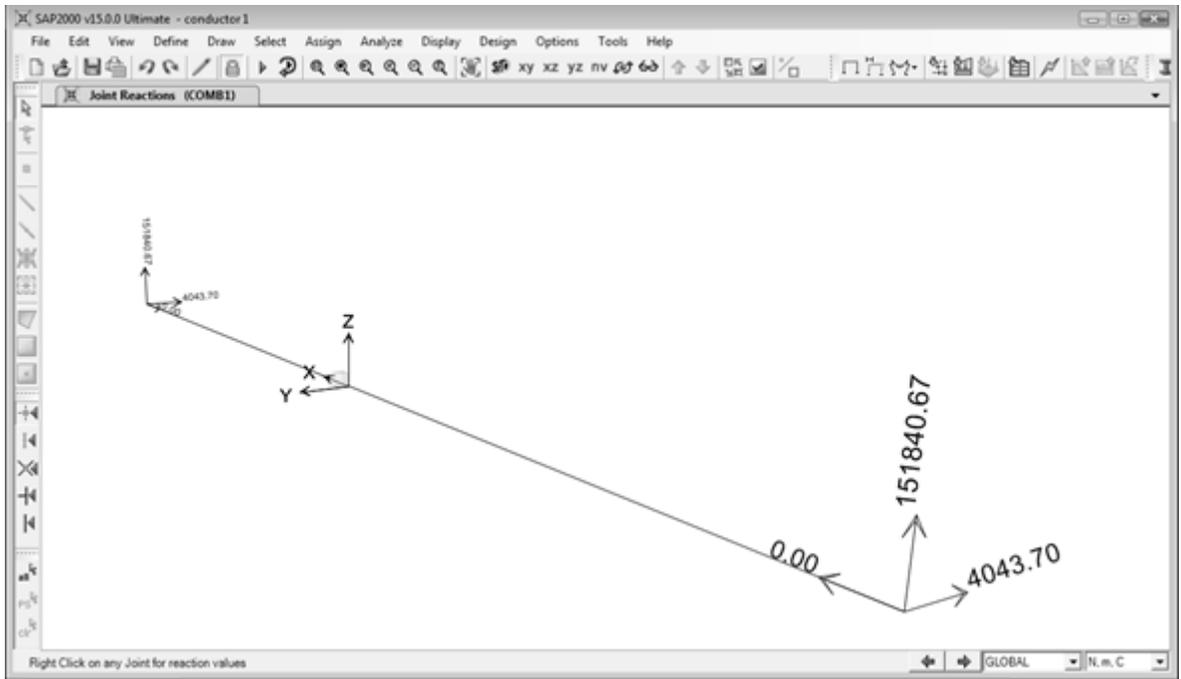


**Figura A1. Aplicación de la carga debida al viento en uno de los cables**



**Figura A2. Aplicación de la carga debida al peso propio de los cables**

La siguiente imagen muestra las reacciones en los poyos del cable, las cuales fueron aplicadas al modelo de la torre para representar los efectos del cable sobre ésta.



**Figura A3. Reacciones en los apoyos de los cables (fuerzas a aplicar a la torre)**