



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

CÁLCULO DEL RIESGO EÓLICO EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:
INDIRA INZUNZA ARAGÓN

TUTOR PRINCIPAL
DR. EDUARDO REINOSO ANGULO
INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO D.F, NOVIEMBRE 2014

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. MARIO GUSTAVO ORDAZ SCHROEDER

Secretario: DR. ADRIÁN POZOS ESTRADA

Vocal: DR. EDUARDO REINOSO ANGULO

1^{er}. Suplente: DR. MAURO POMPEYO NIÑO LÁZARO

2^do. Suplente: DR. ALBERTO LÓPEZ LÓPEZ

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

DR. EDUARDO REINOSO ANGULO

FIRMA



“Ola i ke ahe lau makani”

Existe vida hasta en una ligera brisa de aire

(Proverbio hawaiano)

Todo lo puedo en Cristo que me fortalece

(Filipenses 4, 13)



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), así como a la División de Estudios de Posgrado en Ingeniería, un especial agradecimiento por la oportunidad brindada de continuar con mi formación profesional.

Al Instituto de Ingeniería (IINGEN) por el apoyo, los recursos tecnológicos y espacio laboral prestado, sin ellos este trabajo no hubiera concluido con facilidad.

Al Dr. Eduardo Reinoso Angulo por las facilidades brindadas, por su tiempo, por su ayuda técnica y profesional y sobre todo por la oportunidad de trabajar con él.

Al Dr. Adrián Pozos Estrada, al Dr. Mauro Niño Lázaro, al Dr. Alberto López López y al Dr. Mario Ordaz Schroeder por la colaboración, el tiempo y la disposición otorgada durante la revisión de este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado durante el posgrado, ya que sin él no hubiera sido posible alcanzar este objetivo.

Al comité de Ingeniería sísmológica del IINGEN y ERN por su experiencia y conocimientos compartidos, fueron de gran apoyo durante la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

A mis padres Patricia Aragón Pérez y Juan Inzunza Apodaca, no hay manera de retribuirles todo el amor, cariño y apoyo que me han brindado a lo largo de mi vida, en cada sueño y proyecto que se me ocurra. Todo este trabajo es para ustedes.

A Adriana Inzunza Aragón, como mi hermana y amiga, que me ha escuchado, aconsejado y soportado hasta en los peores momentos.

A mi familia y amigos que son como parte de ella, no acabaría de nombrarlos a cada uno y agradecerles por hacer de mí lo que soy ahora. Muchas gracias por estar a mi lado y también detrás de mí en esta aventura. *Mahalo nui loa.*

CÁLCULO DEL RIESGO EÓLICO EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA

CONTENIDO

	PÁGINA
RESUMEN	I
ABSTRACT	III
ÍNDICE DE TABLAS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1Objetivos	2
1.2Antecedentes	2
CAPÍTULO 2 DESCRIPCIÓN DE LA AMENAZA EÓLICA	7
2.1 Amenaza por viento	7
2.1.1 Análisis probabilista de amenazas	7
2.2 Clasificación del viento	8
2.3 Fenómenos meteorológicos de vientos fuertes.....	10
2.3.1 Huracanes.....	10
2.3.2 Tornados.....	13
2.3.3 Tormentas severas o vaguadas	16
2.4 Mapas de velocidades de viento	18
2.5 Representación digital de la amenaza	23
2.6 Escenarios elegidos para el cálculo del riesgo eólico	23
CAPÍTULO 3 ASPECTOS GENERALES DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA	25
3.1 Definición	25
3.2 Clasificación de torres de transmisión	26
3.3 Componentes de una línea de transmisión eléctrica.....	27
3.4 Descripción de una línea de transmisión eléctrica.....	28
3.4.1 Torre para transmisión de energía eléctrica	28
3.4.2 Cables conductores y de guarda	30
3.4.3 Herrajes	32

3.4.4 Aisladores	32
3.5 Representación digital de los bienes expuestos	33
CAPÍTULO 4 VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA ANTE ACCIONES DEL VIENTO	37
4.1 Generalidades	37
4.1.1 Definición	37
4.1.2 Tipos de vulnerabilidad	37
4.1.3 Factores que afectan la vulnerabilidad	38
4.1.4 Funciones de vulnerabilidad	39
4.2 Efecto del viento en torres de transmisión eléctrica	40
4.3 Fallas comunes en torres de transmisión.....	41
4.4 Efecto del viento sobre cables	45
4.4.1 Desprendimiento de vórtices.....	45
4.4.2 Galope	46
4.4.3 Vibraciones eólicas y oscilaciones en subclaros.....	47
4.5 Metodología para el cálculo de las acciones del viento.....	48
4.5.1 Acciones del viento en torres de transmisión.....	48
4.5.2 Cálculo de las acciones del viento sobre la torre para transmisión eléctrica	57
4.5.3 Acciones del viento en cables	65
4.5.4. Cálculo de las acciones del viento sobre los cables	67
4.6 Metodología para evaluar la vulnerabilidad de las líneas de transmisión eléctrica	67
4.7 Curvas de vulnerabilidad.....	75
4.8 Representación digital de las curvas de vulnerabilidad	79
CAPÍTULO 5 CÁLCULO PROBABILISTA DEL RIESGO.....	81
5.1Definición de riesgo	81
5.2Método probabilista para el cálculo del riesgo.....	81
5.3Estimadores del riesgo	83
5.4Ejemplo de aplicación	83
5.4.1 Análisis por escenario único.....	84
5.4.2 Análisis probabilista	89
5.4.3 Caso de estudio: línea de transmisión Xul-há – Chetumal.....	91

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	95
Recomendaciones	96
APÉNDICES	99
APÉNDICE A.- Escenarios que componen la amenaza por huracán en México	99
APÉNDICE B.- Cálculo de efectos aeroelásticos en cables	109
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113

RESUMEN

En México se han registrado colapsos de torres y líneas de transmisión desde 1966 por efecto de los huracanes, incluso algunas han colapsado ante velocidades de viento menores a las de diseño. Hasta la fecha, las curvas de vulnerabilidad que se han reportado en la literatura para las líneas de transmisión están relacionadas al estado de colapso, lo que las convierte en curvas de fragilidad.

El objetivo principal de esta tesis es el de determinar el riesgo eólico de las líneas de transmisión eléctrica en la República mexicana; y proponer una metodología para calcular la vulnerabilidad estructural de la línea de transmisión eléctrica aérea, considerando solamente el efecto del viento sobre la torre y sobre los cables, sin tomar en cuenta el efecto del empuje de otra torre, falta de piezas, corrosión, entre otras.

Para obtener la curva de vulnerabilidad que permitirá realizar el cálculo del riesgo eólico, en esta tesis se calcularon las fuerzas del viento que actúan sobre los elementos de la línea de transmisión con base en el Manual de Diseño de Obras Civiles (CFE, 2008) y la Especificación CFE J1000-50 (CFE, 2011 b).

La metodología para calcular la vulnerabilidad estructural de la línea de transmisión eléctrica presentada se basa en determinar el nivel de daño mediante un análisis estático lineal y con la inspección de los mecanismos de falla que se forman ante diferentes velocidades de viento actuando a 0°, 45° y 90°.

Con los resultados obtenidos de la caracterización de la vulnerabilidad se presentan los parámetros de la ecuación general de daño y la distribución de probabilidad que se ajusta a la vulnerabilidad de la línea de transmisión. Con ayuda del software CAPRA (ERN-LA *et al.* 2011) se calculó el riesgo eólico para líneas de transmisión eléctrica en México y en el caso de estudio, demostrando que la península de Yucatán y la costa de Jalisco, Colima, Michoacán y Guerrero presentan mayor riesgo eólico.

Finalmente, se presenta una comparación entre los resultados obtenidos al calcular el riesgo eólico considerando las líneas de transmisión en un solo punto y considerándolas como una sucesión de puntos, así como recomendaciones para disminuir las fallas estructurales en las torres de transmisión.

ABSTRACT

There have been towers and transmission lines collapses in Mexico since 1966 as a result of hurricanes, even have been collapsed at lower wind speeds than the design ones. To this day the transmission lines vulnerability curves reported in literature are related to the state of collapse, making them fragility curves.

The main purpose in this thesis is determine the wind risk of electric transmission lines in Mexican republic; and propose a methodology for calculate the structural vulnerability of the overhead transmission line considering the effect of wind on the tower and cables, without taking into account the pull-down effect of another tower, missing parts, corrosion, among others.

To get the vulnerability curve which allows the wind risk calculation, the wind forces acting on the transmission line parts are calculated based on the Civil Design Manual (CFE, 2008) and the CFE J1000-50 specification (CFE, 2011b).

The methodology for calculate the transmission line's structural vulnerability is based on determining the damage level using an static linear pushover and the inspection of failure mechanisms at different wind speeds acting at 0 °, 45 ° and 90 °.

With the results, the parameters of the general damage equation and the probability distribution which adjust to the transmission line's vulnerability are obtained. Using the CAPRA software (ERN-LA *et al.* 2011) the probabilistic wind risk for transmission lines in Mexico and in the study case were calculated, showing that the Yucatan peninsula and the coast of Jalisco, Colima, Michoacán and Guerrero have higher wind risk.

Finally, it is presented a comparison between the results obtained by calculating the risk considering wind transmission lines at a single point and considering them as a sequence of points, and some recommendations to reduce structural failures in transmission towers.

ÍNDICE DE TABLAS

	PÁGINA
Tabla 1. 1 Principales eventos que han causado pérdidas al sector eléctrico en México (CENAPRED 2013, CFE 2013 – 2014).	4
Tabla 2. 1 Parámetros de intensidad considerados para huracanes (Informe Técnico ERN-CAPRA T1-2).	7
Tabla 2. 2 Escala de Beaufort para viento (National Weather Service, 2008).	9
Tabla 2. 3 Escala Saffir-Simpson para huracanes (National Hurricane Center, 2013).	12
Tabla 2. 4 Escala Fujita Mejorada para tornados (National Weather Service, 2004).	15
Tabla 2. 5 Parámetros a, b, c y d para el cálculo de la Ec. 2. 3.	19
Tabla 2. 6 Escenarios propuestos para el análisis de riesgo eólico.....	23
Tabla 3. 1 Secciones estructurales.	30
Tabla 3. 2 Especificaciones del cable conductor ASCR 1113.....	30
Tabla 3. 3 Especificaciones del cable de guarda.	30
Tabla 3. 4 Propiedades de la cadena de aisladores (Morales, 2008).	33
Tabla 3. 5 Campos y tipos de datos que contiene el archivo shape.	35
Tabla 4. 1 Clasificación de las estructuras según su respuesta al viento (CFE, 2008).	50
Tabla 4. 2 Categoría del terreno según su rugosidad (CFE, 2008)	51
Tabla 4. 3 Velocidad regional con base en el tipo de estructuras según su importancia.	51
Tabla 4. 4 Variables α , δ y c (CFE, 2008).....	52
Tabla 4. 5 Valores del factor de topografía local (CFE, 2008).	52
Tabla 4. 6 Valores de la presión barométrica en función de la altura (CFE, 2008).	53
Tabla 4. 7 Coeficiente de arrastre para torres de celosía con elementos planos (CFE, 2011 b).	54
Tabla 4. 8 Valores de las constantes d , b , z_0 , z_{min} , α y α'	56
Tabla 4. 9 Presión dinámica de base producida por la acción del viento.	60
Tabla 4. 10 Factor de amplificación dinámica equivalente producida por el viento a 0°	61
Tabla 4. 11 Fuerza dinámica equivalente producida por la acción del viento a 0°	62
Tabla 4. 12 Fuerza dinámica equivalente producida por el viento a 90°	63
Tabla 4. 13 Fuerzas producidas por el viento a 45° en los ejes x y y	64
Tabla 4. 14 Datos generales para obtener las fuerzas del viento sobre los cables.....	67
Tabla 4. 15 Altura promedio de los cables.	67

Tabla 4. 16 Cálculo de carga uniforme para cables.....	67
Tabla 4. 17 Mecanismos de falla en la estructura.....	70
Tabla 4. 18 Daño esperado para viento a 45° sin considerar el efecto de los cables.....	74
Tabla 4. 19 Descripción del formato del nombre de la función de vulnerabilidad.....	80
Tabla 5. 2 Pérdida anual esperada.	90
Tabla 5. 3 Escenarios críticos.....	91
Tabla 5. 4 Pérdida anual considerando el tramo completo de la línea de transmisión.....	93
Tabla 5. 5 Pérdida anual considerando la línea en un solo punto.	93
Tabla A. 1 Escenarios que componen la amenaza por huracán en México	99
Tabla B. 1 Datos utilizados para calcular los efectos aeroelásticos en cables.	109
Tabla B. 2 Frecuencias naturales de los cables conductor y de guarda	109
Tabla B. 3 Velocidad de desprendimiento de vórtices en cables de guarda y conductores.....	110
Tabla B. 4 Ángulo de inestabilidad en cables debida al galope.....	111

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1. 1 Pérdidas globales por desastres naturales de 1980 al 2012 en el mundo (World Bank, 2013).....	5
Figura 2. 1 Partes de un ciclón tropical (National Weather Service, 2010).	11
Figura 2. 2 Perfil promedio de la velocidad del viento (Franklin et al., 2000).	13
Figura 2. 3 Estructura principal de un tornado	14
Figura 2. 4 Estructura básica del perfil de velocidades del viento para tornados.	16
Figura 2. 5 Proceso de formación de una vaguada (National Weather Service, 2009)	17
Figura 2. 6 Perfil de velocidades de una vaguada (Savory et al., 2000).	18
Figura 2. 7 Perfiles de viento para diferentes tipos de terreno.	21
Figura 2. 8 Mapa de velocidades para un evento.	22
Figura 3. 1 Porción de una línea de transmisión eléctrica aérea	25
Figura 3. 2 Tipos de torres de transmisión.....	26
Figura 3. 3 Partes de una línea de transmisión eléctrica.	27
Figura 3. 4 Distribución de paneles para el cálculo de fuerzas debidas al viento.	29
Figura 3. 5 Estructuración para la torre de transmisión	29
Figura 3. 6 Tensiones en una curva catenaria (Morales, 2008).	31
Figura 3. 7 Configuración de los cables conductores más alejados al nivel de piso.	32
Figura 3. 8 Configuración del cable de guarda.	32
Figura 3. 9 Información de la base de datos utilizada.....	34
Figura 3. 10 Localización de infraestructura expuesta (CFE, 2011 a).....	35
Figura 4. 1 Factores que intervienen en la vulnerabilidad eólica.	38
Figura 4. 2 Función o curva de vulnerabilidad tipo (ERN-LA, 2011).....	40
Figura 4. 3 Falla sin desplome de la estructura (Prasad Rao, 2010).....	42
Figura 4. 4 Falla con desplome de la estructura (El Universal, 2014).	42
Figura 4. 5 Falla por flexión, flexión-compresión (Bahena, 1996).....	43
Figura 4. 6 Falla por tensión, tensión-compresión (Bahena, 1996).	43
Figura 4. 7 Falla el cuerpo piramidal sin afectar la cimentación (Bahena, 1996).	43
Figura 4. 8 Falla la superestructura sin afectar el cuerpo piramidal (Bahena, 1996).	43
Figura 4. 9 Falla en la pata de gallo por fuerza de grandes proporciones (Bahena, 1996).	44
Figura 4. 10 Falla en elementos estructurales por fuerzas de grandes proporciones (Runestone Electric Association, 2011).	44

Figura 4. 11 Falla por ruptura de algún cable (Gaceta electrónica UNAM, 2012).	44
Figura 4. 12 Diagonalización en "K"	45
Figura 4. 13 Falla por incorrecta diagonalización (Prasad Rao et al., 2010).	45
Figura 4. 14 Esquema de velocidades relativas y cargas aerodinámicas que se presentan durante el galope.	47
Figura 4. 15 Movimientos inducidos por el viento en los cables (Morales, 2008).	48
Figura 4. 16 Ángulo de ataque del viento respecto al eje de la línea.	58
Figura 4. 17 Posición de las fuerzas del viento en la torre de transmisión.	59
Figura 4. 18 Cálculo de la altura promedio de los cables.	65
Figura 4. 19 Coeficiente de arrastre CD para cables (Holmes, 2001).	66
Figura 4. 20 Fallas ocasionadas por viento de 120 km/h a 45°	71
Figura 4. 21 Fallas ocasionadas por viento de 125 km/h a 45°	71
Figura 4. 22 Curva de vulnerabilidad para viento a 45° sin considerar el efecto de los cables.	72
Figura 4. 23 Curvas de capacidad estructural sin considerar el efecto de los cables.	72
Figura 4. 24 Curva de capacidad estructural Velocidad – desplazamiento, viento a 45°.	73
Figura 4. 25 Curvas de vulnerabilidad obtenidas por inspección (línea continua) y con la ecuación de daño (línea punteada).	74
Figura 4. 26 Curvas de vulnerabilidad sin considerar el efecto del viento en los cables.	75
Figura 4. 27 Curvas de vulnerabilidad considerando el efecto del viento en los cables.	75
Figura 4. 28 Conjunto de curvas de vulnerabilidad para la torre de transmisión 53T10.	76
Figura 4. 29 Curva de vulnerabilidad para la torre de transmisión 53T10.	76
Figura 4. 30 Curva de vulnerabilidad parametrizada.	77
Figura 4. 31 Curvas de vulnerabilidad y varianza obtenidas con la ecuación de daño y método ATC.	78
Figura 4. 32 Descripción de archivo .fvu	79
Figura 4. 33 Archivo generador del shape de base de datos.	80
Figura 5. 1 Porcentaje de pérdidas. Huracán Gilberto.	84
Figura 5. 2 Porcentaje de pérdidas. Huracán Paulina	85
Figura 5. 3 Porcentaje de pérdidas. Depresión Juliette.	85
Figura 5. 4 Porcentaje de pérdidas. Huracán Isidore.	86
Figura 5. 5 Porcentaje de pérdidas. Huracán Emily.	86
Figura 5. 6 Porcentaje de pérdidas. Huracán Wilma.	87
Figura 5. 7 Porcentaje de pérdidas. Huracán Dean.	87
Figura 5. 8 Porcentaje de pérdidas. Huracán Alex.	88

Figura 5. 9 Porcentaje de pérdidas. Huracán Ernesto.....	88
Figura 5. 10 Riesgo eólico en líneas de transmisión eléctrica.....	89
Figura 5. 11 Pérdida Máxima Probable	91
Figura 5. 12 Pérdida total en línea de transmisión tramo Xul-há - Chetumal.....	92
Figura 5. 13 Pérdida total en torres de transmisión en Chetumal.....	92
Figura B. 1 Flujo a través de un cilindro (CFE, 2008).....	110
Figura B. 2 Coeficientes de arrastre y sustentación para cables con una capa de hielo.....	111



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Una línea de transmisión eléctrica es un sistema compuesto de un conjunto de elementos para transportar o guiar la energía eléctrica desde una fuente de generación a los centros de consumo de manera económica y eficiente. Forman parte de los sistemas y servicios denominados “líneas vitales”, es decir, fundamentales para el funcionamiento de la sociedad. Este tipo de sistemas adquieren primordial importancia en los casos de desastres, pues de éstas depende en buena parte el funcionamiento de una ciudad, el manejo de la emergencia y la recuperación de la misma.

En México se han registrado 346 colapsos de torres para transmisión eléctrica entre 1966 y el 2006, ocasionados por efectos de huracanes (Morales, 2008). El CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres) reportó en el año 2006, pérdidas asociadas al efecto y acción de huracanes por más de 674 millones de dólares para el periodo de octubre del 2005 a julio del 2006 (Morales, 2008). De igual manera, según boletines informativos de la CFE (Comisión Federal de Electricidad), colapsan 33 torres en promedio cada temporada de huracanes del 2005 al 2013. Algunas líneas de transmisión han colapsado ante velocidades de viento menores a las velocidades de diseño correspondientes, o para eventos de gran magnitud que han ocurrido en el pasado, se subestima el daño causado por el huracán.

Para garantizar la seguridad e integridad de las líneas vitales, es imprescindible evaluar la amenaza del sitio y los diferentes peligros asociados, así como evaluar su vulnerabilidad ante las diferentes amenazas meteorológicas a las cuales puedan estar expuestas. Con ello se pueden aplicar las medidas de prevención y mitigación que sean necesarias, y establecer niveles de riesgo aceptables.

Hasta la fecha, las curvas de vulnerabilidad que se han reportado en la literatura para las líneas de transmisión están relacionadas al estado de colapso, lo que las convierte en curvas de fragilidad. En esta tesis se busca entonces, crear curvas de vulnerabilidad que consideran estados de falla adicionales como el de capacidad y efecto del viento en los cables. Para este estudio se omitieron los estados de falla causados por corrosión, mantenimiento, falta o robo de piezas y dando por hecho que las conexiones están adecuadamente detalladas.

Para esta tesis se seleccionó un diseño específico, previamente diseñado por la Compañía Luz y Fuerza del Centro, semejantes en dimensiones generales y estructuración a las torres colapsadas en la línea Nizuc - Playa del Carmen, durante el huracán Wilma, en el 2005 (Sordo – Zabay *et al.*, 2006). Este modelo fue elegido debido a que se disponía de información técnica sobre la misma.

Se revisaron y utilizaron los criterios establecidos en el Manual de Obras Civiles – Diseño por Viento de la CFE (CFE, 2008) y la especificación CFE J1000 – 50 (CFE, 2011 b) para la obtención de acciones debidas al viento. Se podría haber usado alguna otra normativa internacional, sin embargo, no se emplean en este estudio debido a que se busca relacionar parámetros de diseño utilizados comúnmente en territorio nacional.

Para definir los elementos mecánicos que ocasionan la falla de los elementos de la porción de línea considerada, se utilizó el programa SAP2000 (CSI, 2013). De igual manera se analizó el comportamiento estructural aislado y en conjunto de una torre y de los cables de guarda y conductores. Así mismo se tomó en cuenta consideraciones realizadas en estudios previos y resultados de pruebas a gran escala (Savory *et al.* 2000, Sordo–Zabay *et al.* 2006, Albermani *et al.* 2008, Prasad *et al.* 2010, Tapia *et al.* 2012, Aboshosha *et al.* 2013, Zhang *et al.* 2013).

La evaluación de riesgo requiere de tres pasos de análisis: la evaluación de la amenaza, definición del inventario de elementos expuestos y la vulnerabilidad de las construcciones.

El procedimiento de cálculo probabilista del riesgo consiste básicamente en evaluar las pérdidas en el grupo de activos expuestos durante cada uno de los escenarios, en este caso huracanes, que colectivamente describen la amenaza, y luego integrar probabilísticamente los resultados obtenidos utilizando como factores de peso, las frecuencias de ocurrencia de cada escenario.

El cálculo del riesgo eólico de las líneas de transmisión eléctrica para diversos escenarios (huracanes) históricos y posibles eventos futuros, así como la obtención de parámetros económicos que representan el riesgo, se realizó mediante el programa CAPRA (ERN-LA *et al.*, 2011).

1.1 OBJETIVOS

A pesar de tratarse de estructuras clasificadas según el Manual de Obras Civiles – Diseño por Viento de la CFE (MDOC-DV) en el Grupo B debido a su importancia (CFE, 2008), las líneas de transmisión colapsan ante eventos atmosféricos como huracanes. Debido a ello, el objetivo principal de esta tesis es analizar el riesgo eólico que presentan las líneas de transmisión eléctrica en la República Mexicana.

Lo anterior se pretende lograr analizando los componentes de la línea de transmisión eléctrica y la normativa mexicana (MDOC-CV y especificación CFE J1000 – 50) que rige el diseño de las torres para transmisión eléctrica, cables, herrajes y accesorios. Así como el análisis del comportamiento estructural aislado de una torre para transmisión y el de los cables de guarda y conductores.

De igual manera, se busca determinar las fallas más comunes de las torres de transmisión eléctrica ante la amenaza eólica. Se consideran los modos de falla por capacidad de los elementos y efectos del viento sobre los cables para elaborar la curva de vulnerabilidad, por su importancia y porque se refleja el comportamiento estructural de la torre de transmisión en interacción con los cables.

1.2 ANTECEDENTES

En la República Mexicana se presentan anualmente, en promedio, veintidós huracanes de gran intensidad, esto quiere decir que las velocidades de viento que impactan a las estructuras varían entre 60 (Depresión tropical) y más de 250 km/h (Categoría 5).

Boletines informativos de la CFE ante huracanes y reportes anuales CENAPRED indican de manera somera la afectación ocasionada por el paso de un huracán, debido a la amenaza del viento. Se han reportado por el CENAPRED pérdidas asociadas al efecto y acción de huracanes por más de 674

millones de dólares para el periodo de octubre del 2005 a julio del 2006, así como por la CFE el colapso de 346 torres de transmisión de 1966 a 2006 por efectos de fenómenos atmosféricos (Morales, 2008).

En la Tabla 1. 1 se pueden apreciar diversos eventos que han causado grandes pérdidas al sector eléctrico y se han registrado torres eléctricas derribadas a causa de las velocidades de viento.

Con base en ello se ha percibido que a pesar de que las torres para transmisión de energía eléctrica son estructuras importantes, clasificadas en el Grupo B según el MDOC-DV (CFE, 2008), han fallado durante el paso de huracanes por el territorio nacional, incluso ante el paso de tormentas tropicales, cuyas velocidades de viento son inferiores a la velocidad de diseño correspondientes. Así mismo, no existen datos exactos para eventos históricos como el Huracán Gilberto (1988, categoría 5), o datos confiables como para el Huracán Wilma (2005, categoría 5), para los cuales las velocidades de viento exceden las velocidades de diseño.

Existe la incertidumbre acerca del incremento del peligro eólico, pues se tiene la teoría del aumento en la frecuencia e intensidad de los huracanes en el océano Atlántico debido al calentamiento global. Según el Banco Mundial, las pérdidas anuales por desastres naturales relacionados con el clima (sequías, huracanes) están en aumento, como se puede observar en la Figura 1. 1. Aunque siempre hay incertidumbre acerca de los resultados futuros, debemos esperar que ocurran eventos atmosféricos de vientos intensos para tener un periodo de observación más amplio y corroborar si en realidad el peligro eólico tiende a ser mayor.

La importancia del potencial dañino de los tornados y tormentas severas en México se ha visto minimizada debido a que la ocurrencia de estos fenómenos ha sido registrada como asuntos anecdóticos y que es difícil detectarlos. Sin embargo, se han registrado en el territorio nacional durante el periodo de 2000 a 2012, 126 tornados en total, con un promedio anual de 9.7 (Macías *et al.*, 2013). A pesar de ello sólo dos han podido categorizarse formalmente: el ocurrido en Piedras Negras, Coahuila, en 2007 calificado en la escala Fujita – Mejorada como EF3 y el de la Ciudad de México, en 2012, categorizado como EF2 (Macías *et al.*, 2013). Se reportaron daños directos en el sector eléctrico de 25,168 miles de pesos ocasionados por el tornado de Piedras Negras (CENAPRED, 2013).

Los eventos atmosféricos que generan velocidades de viento intensas como huracanes, tornados y tormentas severas, claramente afectan a las torres y líneas de transmisión. El fallo estructural de una torre de transmisión compromete el funcionamiento de toda la línea de transmisión, pues es el soporte de la línea. Muchas veces el servicio eléctrico se ve suspendido por días e incluso semanas afectando a miles de usuarios. De igual manera, en muchos casos las pérdidas indirectas como los flujos de bienes y servicios que se dejan de producir durante el período en que se lleva a cabo la reconstrucción de la infraestructura física, superan a los costos directos. Por ello es indispensable saber y comprender las causas ante las cuales una torre para transmisión eléctrica no cumple con algún estado de servicio.

Tabla 1. 1 Principales eventos que han causado pérdidas al sector eléctrico en México (CENAPRED 2013, CFE 2013 – 2014).

AÑO	EVENTO	CAT.	VEL. km/h	ESTADOS AFECTADOS	PÉRDIDAS DIRECTAS (SECTOR ELÉCTRICO) mdp	PÉRDIDAS INDIRECTAS mdp	TORRES DERRIBADAS	USUARIOS AFECTADOS
1997	H. Paulina	4	240	Oaxaca y Guerrero	--	--	60	105000
2001	D.T. Juliette	D	< 63	Sonora y Baja California Sur	29.3	15.7	27	100404
2002	H. Isidore	3	85 a 205, rachas 250	Yucatán	296	--	9	--
				Campeche	26	--	36	82925
2002	H. Kenna	3	185, rachas 205	Nayarit	159.5	31.5	58	280000
2003	T.T. Ignacio	T	110, rachas 140	Baja California Sur	139.4	9.4	141	--
2005	H. Emily	4	215, rachas de 260	Quintana Roo	50.132	1.5	1	197018
				Yucatán	157.46	4.869	1	--
2005	H. Stan	1	130, rachas 155	Oaxaca	40	1.1	--	40000
				Veracruz	150	7	7	--
				Chiapas	136.87	117.96	--	81782
2005	H. Wilma	4	220, rachas 270	Quintana Roo	240.3	57.1	253	--
				Yucatán	30.11	--	--	--
2006	H. Lane	3	185	Sinaloa	360	105	194	78000
2007	H. Dean	5	278	Quintana Roo	90	--	7	92000
			130, rachas 165	Campeche	18	--	--	--
2008	H. Norbert	2	175, rachas 210	Baja California Sur	67.9	2.1	3	43000
2009	H. Jimena	2	113, rachas 146	Baja California Sur	114.18	3.53	--	71000
				Sonora	107.75	3.665	4	--
2010	H. Alex	2	175	Tamaulipas	39.445	44.09	21	--
2012	H. Ernesto	2	155	Quintana Roo	--	--	5	420534
2013	T.T. Fernand	T	92.6	Veracruz	--	--	4	104423
2014	H. Odile	3	205, rachas 250	Baja California Sur	--	--	111	239211

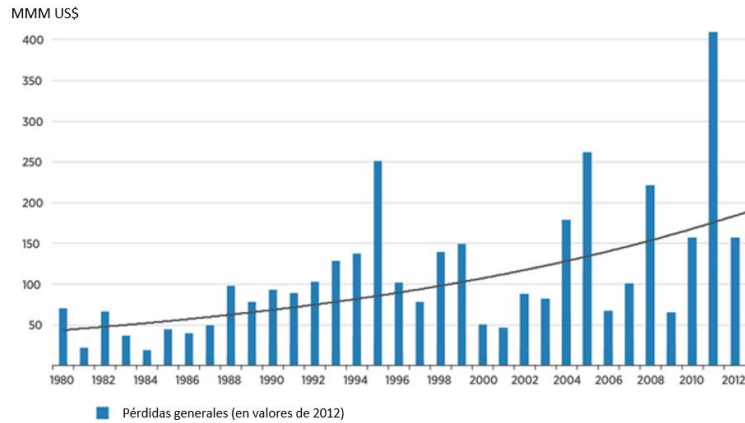


Figura 1. 1 Pérdidas globales por desastres naturales de 1980 al 2012 en el mundo (World Bank, 2013).

Se han realizado pocos análisis de riesgo eólico en líneas de transmisión, debido a la dificultad de representar el comportamiento de vientos intensos y a que las torres de transmisión se consideran como estructuras muy difíciles de analizar puesto que poseen un gran número de elementos, las conexiones son muy detalladas, existen incertidumbres de referentes a la excentricidad de los miembros y sobre todo su interacción con los cables y accesorios. Sin embargo se ha evaluado el riesgo ocasionado por el paso de un tornado con modelos estocásticos para simular las velocidades de viento y representado el riesgo como probabilidad de falla de la estructura (Li, 1998) así como por las velocidades de viento ocasionadas por un huracán en Carolina del Sur, EE. UU. (Pang *et al.* 2012).

Para comprender el comportamiento de las torres de transmisión Albermani y Kitipornchai (2003) proponen un análisis no lineal ejecutado con un programa desarrollado por la Electric Power Research Institute (EPRI) en 1968, considerando el modelo como un conjunto de vigas y columnas debido a que los resultados obtenidos con el software se asemejaban más a los de las pruebas si se consideraban los elementos de las torres de transmisión con capacidad de transmitir momentos.

Siguiendo la misma metodología, Sordo-Zabay *et al.* (2006) han efectuado análisis de torres de transmisión con el método del empujón estático puntualizando las masas de los cables, las tensiones de los mismos ante las velocidades de viento, herrajes y accesorios en los nodos de las crucetas, obteniendo así el comportamiento estructural, las características dinámicas y el lugar de la formación de las articulaciones plásticas que originan la falla.

La importancia del diseño de los miembros secundarios y el detalle en las conexiones fue estudiado por Prasad Rao *et al.* (2010) mediante un análisis no lineal de elemento finito. Con dicho estudio se pudo examinar la causa de las fallas prematuras, antes de llegar a la velocidad máxima de diseño, en torres para transmisión de energía eléctrica con voltajes entre 220 kV a 400 Kv ante fuerzas de viento.

Con base en los resultados de dichas investigaciones, se busca proponer una metodología que permita obtener la curva de vulnerabilidad estructural de las líneas de transmisión y posteriormente calcular el riesgo eólico al cual en México.

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DE LA AMENAZA EÓLICA

2.1 AMENAZA POR VIENTO

La amenaza se puede definir como un peligro latente que representa la posible manifestación, dentro de un período de tiempo y en un territorio particular, de un fenómeno de origen natural, socio-natural o antropogénico, que puede producir efectos adversos en las personas, la producción, la infraestructura, los bienes y servicios y el ambiente.

La amenaza asociada con un fenómeno natural se mide mediante la frecuencia de ocurrencia y la severidad mediante algún parámetro de intensidad del peligro determinado en una ubicación geográfica específica. Para ello, se plantean modelos probabilistas de evaluación, que se basan en la definición de escenarios (huracanes, tornados o vaguadas) particulares de diferente magnitud, caracterizados por una frecuencia de ocurrencia específica, que corresponde con las tendencias históricas de recurrencia observadas de la amenaza bajo análisis.

2.1.1 Análisis probabilista de amenazas

El objetivo principal del análisis probabilista de amenazas es proporcionar la información necesaria con el fin de calcular en forma confiable los diferentes parámetros probabilistas relacionados con las pérdidas y efectos de los diferentes fenómenos naturales para diferentes periodos de retorno.

El resultado de la evaluación de la amenaza es una base de datos para cada uno de los peligros estudiados, que contiene un conjunto de eventos estocásticos, característicos de la amenaza global, mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos, que corresponden a todos los posibles escenarios de amenaza que pueden presentarse en la región.

La Tabla 2. 1 describe los parámetros de intensidad para cada tipo de amenaza producido por el paso de un huracán.

Tabla 2. 1 Parámetros de intensidad considerados para huracanes (Informe Técnico ERN-CAPRA T1-2).

EVENTO	AMENAZA	PARÁMETRO DE INTENSIDAD
Huracán	Vientos huracanados	Velocidades de viento.
	Lluvia huracanada	Distribución de la profundidad de la precipitación.
	Marea de tormenta	Profundidad del área de inundación. Extensión del área de inundación.

2.2 CLASIFICACIÓN DEL VIENTO

El viento es el movimiento de la masa del aire en la atmósfera causado por las diferencias de presión atmosférica, atribuidas a la variación de temperatura sobre las diversas partes de la superficie terrestre.

En meteorología se suelen denominar los vientos según su fuerza y la dirección desde la que soplan. La primera se mide según la escala de Beaufort que va desde el 0 (calma absoluta) hasta el 12 (huracán) tal como se describe en la Tabla 2. 2. La intensidad es directamente proporcional a la diferencia de presión entre el lugar de origen del viento y el de su llegada. Por otra parte la dirección está relacionada con la rotación terrestre.

De acuerdo con la escala o dimensión del recorrido los vientos pueden ser de tres tipos:

- **Vientos planetarios:** también denominados globales o constantes. Se generan por el movimiento de rotación terrestre, que origina un calentamiento atmosférico desigual, creando franjas latitudinales de altas y bajas presiones.
- **Vientos regionales:** están determinados por la distribución de tierras, mares y grandes relieves continentales.
- **Vientos locales:** se presentan en un lugar determinado y por variaciones diarias de temperatura y presiones, como las brisas marina, terrestre, de valle y de montaña.

Existe otra clasificación para el viento, la cual distingue entre vientos ciclónicos y anticiclónicos. En las áreas anticiclónicas la presión es superior a la del aire circundante a diferencia de las ciclónicas donde la presión es inferior. El aire nunca se encuentra en absoluta calma, porque en las áreas ciclónicas se forma una especie de vacío a donde acuden las masas de aire vecinas que están a presión más alta.

El Centro Nacional de Huracanes (NHC, por sus siglas en inglés) reporta las velocidades del viento ciclónico como vientos sostenidos, los cuales se obtienen con un tiempo de promediación de un minuto observado a una altura de diez metros con una exposición sin obstáculos. Éstos son los vientos más fuertes de superficie que ocurren durante un minuto dentro de la circulación del sistema.

De igual manera se hace referencia a las ráfagas, las cuales son vientos máximos de unos segundos (3-5 s). Típicamente, en un ambiente de huracán, el valor máximo de tres segundos de ráfagas durante un período de un minuto es en el orden de 1.3 veces (o 30% más fuerte) más que un minuto de vientos sostenidos.

Tabla 2. 2 Escala de Beaufort para viento (National Weather Service, 2008).

NÚMERO DE BEAUFORT	DENOMINACIÓN	VELOCIDAD DEL VIENTO (km/h)	EFFECTOS EN TIERRA	ASPECTO DEL MAR	ALTURA DE OLA (m)
0	Calma	0 a 1	Calma, el humo asciende verticalmente	Despejado	0
1	Aire ligero	2 a 5	El humo indica la dirección del viento	Pequeñas olas, pero sin espuma	0.1
2	Brisa ligera	6 a 11	Se caen las hojas de los árboles, empiezan a moverse los molinos de los campos	Crestas de apariencia vítrea, sin romper	0.2 – 0.3
3	Brisa suave	12 a 19	Se agitan las hojas, ondulan las banderas	Pequeñas olas, crestas rompientes.	0.6 – 1
4	Brisa moderada	20 a 28	Se levanta polvo y papeles, se agitan las copas de los árboles	Borreguillos numerosos, olas cada vez más largas	1 – 1.5
5	Brisa fresca	29 a 38	Pequeños movimientos de los árboles, superficie de los lagos ondulada	Olas medianas y alargadas, borreguillos muy abundantes	2 – 2.5
6	Brisa fuerte	39 a 49	Se mueven las ramas de los árboles, dificultad para mantener abierto el paraguas.	Comienzan a formarse olas grandes, crestas rompientes, espuma	3 – 4
7	Vendaval moderado	50 a 61	Se mueven los árboles grandes, dificultad para caminar contra el viento	Mar grueso, con espuma arrastrada en dirección del viento	4 – 5.5
8	Vendaval fresco	62 a 74	Se quiebran las copas de los árboles, circulación de personas muy dificultosa	Grandes olas rompientes, franjas de espuma	5.5 – 7.5
9	Vendaval fuerte	75 a 88	Daños en árboles, imposible andar contra el viento	Olas muy grandes, rompientes. Visibilidad mermada	7 – 10
10	Vendaval temporal	89 a 102	Árboles arrancados, daños en la estructura de las construcciones	Olas muy gruesas con crestas empenachadas. Superficie del mar blanco.	9 – 12.5
11	Tormenta	103 a 117	Destrucción en todas partes, lluvias muy intensas, inundaciones muy altas	Olas excepcionalmente grandes, mar completamente blanca, visibilidad muy reducida	11.5 – 16
12	Huracán	> 118	Voladura de autos, árboles, casas, techos y personas.	Olas excepcionalmente grandes, mar blanca, visibilidad nula	> 16

2.3 FENÓMENOS METEOROLÓGICOS DE VIENTOS FUERTES

2.3.1 Huracanes

El término "huracán" tiene su origen en la cultura Maya en alusión al dios de las tormentas; es conocido en la India con el nombre de "ciclón", en las Filipinas se le denomina "baguio", en el oeste del Pacífico norte se le llama "tifón", y en Australia "Willy-Willy". Estos términos identifican un mismo fenómeno meteorológico (Secretaría de Marina, 2012).

Un huracán o ciclón tropical es un sistema rotatorio y organizado de nubes y tormentas que se origina en aguas tropicales y subtropicales y se desplaza a velocidades pequeñas, con rotación antihoraria en el Hemisferio Norte y horaria en el Hemisferio Sur.

Un huracán puede formarse a partir de una zona de inestabilidad y de una onda tropical, sin embargo, se precisan ciertas condiciones para que pueda desarrollarse, las cuales se mencionan a continuación (Secretaría de Marina, 2012):

1. Temperatura superficial del océano mayor a 27° C.
2. Fuerza de Coriolis suficientemente fuerte para que se inicie el movimiento de rotación alrededor del centro de baja presión. Esta condición se cumple entre los 5° y 30° de latitud.
3. Diferencia entre los niveles de presión de 850 a 200 milibares.
4. Suficiente humedad relativa en la troposfera media.
5. Una perturbación tropical.

El aire cálido y húmedo sobre los océanos se eleva cerca de la superficie en zonas donde la temperatura es de 27°C o más y la fuerza de rotación de la tierra (Fuerza de Coriolis) es suficientemente fuerte para que se inicie el movimiento de rotación alrededor del centro de baja presión. Como el aire se mueve hacia arriba y se aleja de la superficie, queda menos aire cerca de la superficie, es decir, el aire cálido se eleva causando un área de menor presión de aire cerca del océano.

Los vientos más fuertes se dan en los niveles bajos, el flujo hacia el interior en niveles bajos se dirige hacia arriba en las nubes que forman la pared del ojo, rodeando primero el centro y yéndose luego hacia afuera. En otras palabras, el aire con mayor presión llena el área de baja presión, que se calienta y se eleva, luego el aire circundante gira para ocupar su lugar. Cuando el aire cálido y húmedo se eleva y se enfría, el agua en el aire gira y crece.

La evolución de un ciclón tropical puede ser dividida en cuatro etapas:

1. **Nacimiento.** Se forma una depresión atmosférica, la "depresión tropical" se caracteriza porque el viento empieza a aumentar en superficie con una velocidad máxima menor de 34 nudos (63 km/h), las nubes comienzan a organizarse y la presión desciende.
2. **Desarrollo.** La depresión se desarrolla y adquiere características de "tormenta tropical", el viento sostiene una velocidad entre 34 y 63 nudos (63 y 119 km/h), empieza a formarse un centro pequeño, generalmente circular llamado "ojo" y el movimiento de las nubes es en espiral.
3. **Madurez.** El sistema adquiere las características de un Huracán alcanzando velocidades mayores a 63 nudos (119 km/h), el área nubosa se expande obteniendo un diámetro entre

500 y 900 km, produciendo intensas precipitaciones. El ojo del huracán varía entre 24 y 40 km.

4. **Disipación.** El sistema se adentra en aguas más frías o entra a tierra firme, perdiendo energía y empieza a disolverse debido a las bajas temperaturas o la fricción de la superficie, respectivamente.

2.3.1.1 Partes de un huracán

El huracán en plena madurez está conformado por las partes descritas a continuación y representadas en la Figura 2. 1:

- a) **Ojo del Huracán:** es la zona central del huracán. Se caracteriza por presentar vientos débiles, poca presencia de nubes y precipitación ligera. Puede llegar a presentar 20 a 35 km de ancho y se desplaza a velocidades entre 20 y 35 km/h.
- b) **Pared del ojo:** en torno al ojo del huracán, se encuentra una zona de nubes en la cual se presentan los vientos más fuertes y las lluvias más intensas.
- c) **Alrededor de la pared del ojo:** son las zonas adyacentes con amplia presencia de nubes y en las cuales los vientos tienen una dirección hacia el centro del huracán, aumentando la humedad y el calor de éste.



Figura 2. 1 Partes de un ciclón tropical (National Weather Service, 2010).

2.3.1.2 Escala de medición

La escala Saffir-Simpson (Tabla 2. 3) clasifica a los huracanes del 1 al 5 basándose en la velocidad de los vientos sostenidos. Esta escala estima apropiadamente el daño potencial. Los huracanes mayores a la categoría tres son considerados como huracanes mayores debido al potencial de daño y de pérdida de vidas humanas (National Hurricane Center, 2013).

Tabla 2. 3 Escala Saffir-Simpson para huracanes (National Hurricane Center, 2013).

CATEGORÍA	VIENTOS SOSTENIDOS	TIPOS DE DAÑO
1	64 – 82 kt 119 – 153 km/h	Vientos muy peligrosos que producirán algunos daños. Viviendas con estructura bien construida podrían sufrir daño en el techo, tejas, recubrimientos de vinil y canaletas. Ramas grandes podrían ser proyectadas y los árboles superficialmente arraigados pueden ser derribados. Extensos daños en líneas eléctricas y postes.
2	83 – 95 kt 154 – 177 km/h	Vientos extremadamente peligrosos que producirán grandes daños. Viviendas con estructura bien construida podrían sufrir importantes daños en el techo y paredes. Muchos árboles superficialmente arraigados podrían ser proyectados o arrancados de raíz y bloquear carreteras. Pérdida casi total de energía.
3	96 – 112 kt 178 – 208 km/h	Daño devastador. Viviendas con estructura bien construida podrían sufrir graves daños o la eliminación de cubierta del techo. Muchos árboles pueden ser proyectados o arrancados de raíz, bloqueando carreteras. La electricidad y el agua no estarán disponibles durante varios días o semanas después de que pase la tormenta.
4	130– 136 kt 209– 251 km/h	Daño catastrófico. Viviendas con estructura bien construida podrían sufrir graves daños, con pérdida de la mayor parte de la estructura del techo y / o algunos muros exteriores. La mayoría de los árboles serán proyectados o arrancados de raíz y postes de electricidad derribados. Los apagones duran semanas, posiblemente meses. La mayor parte de la zona será inhabitable por semanas o meses.
5	> 137 kt > 252 km/h	Daño catastrófico. Un alto porcentaje de viviendas será destruido, con fallo total de la azotea y el colapso de la pared. Los árboles caídos y postes de electricidad aislarán las zonas residenciales. Los cortes de energía tendrán una duración de semanas a meses. La mayor parte de la zona será inhabitable por semanas o meses.

2.3.1.3 Variación de la velocidad del viento con la altura

Franklin, Black y Valde (2000) realizaron un estudio basado en muestras de 350 perfiles de la velocidad del viento en el ojo de huracanes entre 1997 y 1999, obtenidos mediante registros y sondas aéreas y sistemas GPS.

La Figura 2. 2, muestra el perfil de la velocidad media del viento en el ojo del huracán, en la cual el viento ha sido normalizado para la velocidad que se presenta a una altura de 3,048 m. Se puede observar que la velocidad mayor se presenta a una altura de 500 m que es 20% mayor a la de un perfil de velocidades de viento promedio.

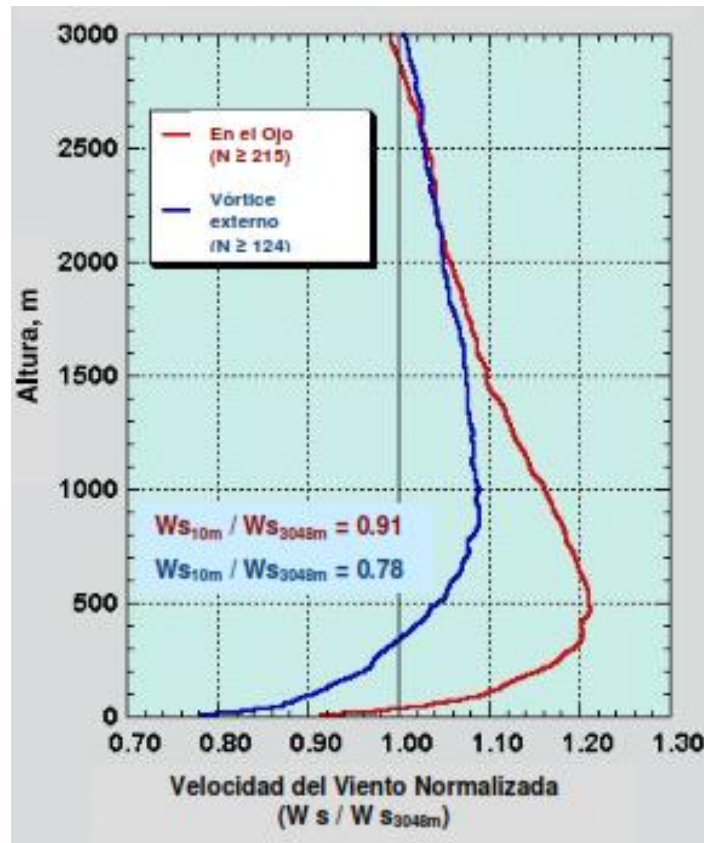


Figura 2. 2 Perfil promedio de la velocidad del viento (Franklin et al., 2000).

2.3.2 Tornados

Un tornado es una columna de aire que rota de 2 a 50 r.p.m., que en su extremo inferior está en contacto con la superficie de la Tierra y el superior con una nube cumulonimbus o con la base de una nube cúmulus. Se trata del fenómeno atmosférico ciclónico de mayor densidad energética de la Tierra.

Los tornados se forman a partir de una tormenta denominada “Supercelda” la cual es una tormenta inmensa en rotación, con corrientes ascendentes, granizo y vientos en línea recta. Ésta, a su vez, se da cuando una corriente de aire frío y seco aire polar, descienden desde lo alto de una nube y chocan con aire tropical húmedo que asciende por el frente.

El ciclo de vida de un tornado se podría resumir de la siguiente manera:

- **Formación:** primero debe formarse la supercelda del propio tornado. El aire frío desciende y obliga al aire caliente a subir. Si las diferencias de temperatura son lo suficientemente grandes, el descenso de aire frío se puede dar en forma de remolino, llamado corriente descendente del flanco trasero (RFD por sus siglas en inglés); mientras el aire ascendente aumentan la rotación y se convierten en una columna estrecha conocida como nube embudo.

- **Madurez:** el sistema crece hasta alcanzar una etapa madura, causando el mayor daño y llegando a sus dimensiones máximas. La RFD es un área de vientos superficiales fríos, se coloca alrededor del tornado interrumpiendo el flujo de aire caliente que lo alimenta.
- **Disipación:** al envolver la RFD completamente al tornado, el vórtice comienza a debilitarse y se vuelve delgado. Los vientos pueden incrementar en su velocidad.

2.3.2.1 Partes de un tornado

Un tornado en plena madurez se compone principalmente como sigue:

- Nube madre:** generalmente del género Cumulonimbus, se caracteriza por su gran desarrollo vertical y por su forma de yunque.
- Embudo:** también denominado como manga, va desde la nube madre hasta el suelo.
- Vórtice:** es la parte inferior del embudo, de menor diámetro y con mayor aceleración del aire. Ésta entra en contacto con la tierra causando daños.

La Figura 2. 3 representa la estructura principal de un tornado.

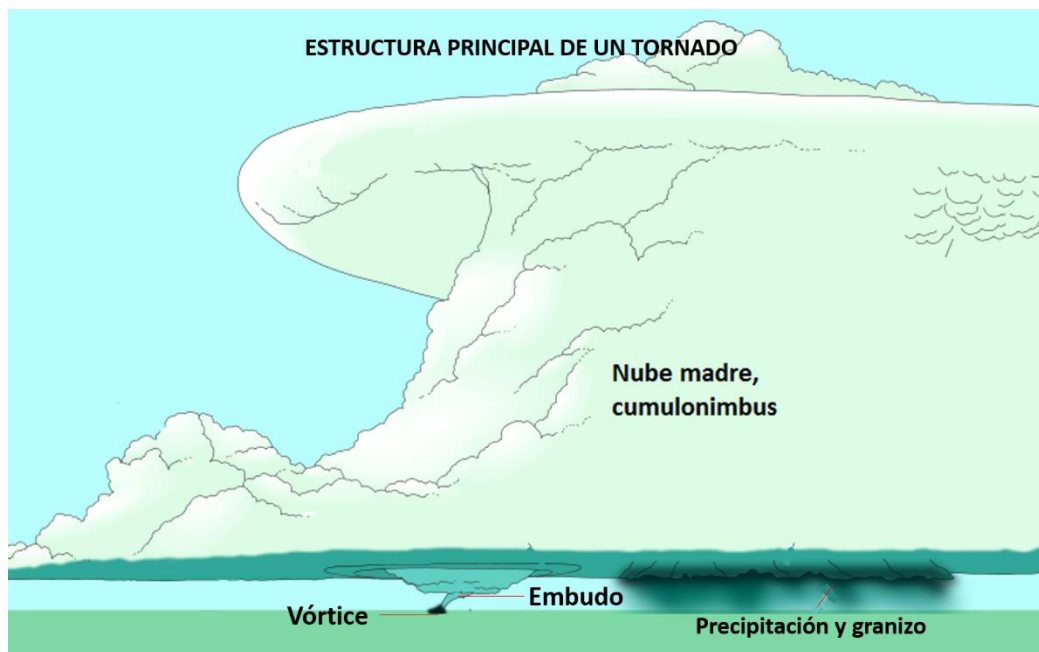


Figura 2. 3 Estructura principal de un tornado

2.3.2.2 Escala de medición

La escala Fujita (F) fue originalmente desarrollada por el Dr. Tetsuya Theodore Fujita para estimar las velocidades del viento de un tornado, basándose en el daño causado por su paso. La escala Fujita Mejorada (EF) (Tabla 2. 4) fue desarrollada por un comité de meteorólogos e ingenieros eólicos con el fin de realizar mejoras a la escala original. Esta escala (EF) ha reemplazado a la original escala el 1 de febrero de 2007.

Tabla 2. 4 Escala Fujita Mejorada para tornados (National Weather Service, 2004).

ESCALA	VELOCIDAD DEL VIENTO km/h	DAÑOS POTENCIALES
EF0	105–137	Daños leves. Algunas tejas caídas y otras pequeñas piezas de los tejados arrancadas, algunos daños en canaletas, ramas de árboles rotas y algunos árboles poco profundos arrancados. Los tornados que no causan daños visibles (por ejemplo aquellos que se producen en campos abiertos) se valoran siempre como de EF0.
EF1	138–178	Daños moderados. Tejados seriamente despedazados, casas rodantes y casetas volcadas o seriamente dañadas, pérdida de puertas exteriores y ventanas y otros cristales rotos.
EF2	179–218	Daños considerables. Tejados de casas sólidas arrancados, los cimientos de las casas se pueden mover, casas rodantes completamente destruidas, arboles grandes partidos o arrancados, pequeños objetos convertidos en proyectiles, coches arrancados del suelo.
EF3	219–266	Daños graves. Pisos enteros de casas bien construidas destruidos, daños graves a los edificios grandes (tales como centros comerciales), trenes volcados, árboles descortezados, vehículos pesados levantados del suelo y arrojados a distancia, estructuras con cimientos débiles lanzados a cierta distancia.
EF4	267–322	Daños devastadores. Tanto las casas de concreto y mampostería como las de madera pueden quedar completamente destruidas, los coches pueden ser proyectados como misiles.
EF5	>322-450	Daños increíbles. Las casas fuertes pueden quedar arrasadas hasta los cimientos, las estructuras de concreto armado dañadas críticamente, los edificios altos sufren graves deformaciones estructurales. Devastaciones increíbles.

2.3.2.3. Variación de la velocidad del viento con la altura

Los tornados se caracterizan por tener un fuerte movimiento del vórtice en el plano horizontal, tal vez con vórtices de succión secundaria, y estos movimientos entran en convección lateralmente por el viento atmosférico.

La Figura 2. 4 muestra la estructura básica de un tornado modelado matemáticamente para el cual se tienen tres componentes de velocidad: tangencial, radial y vertical, y su variación temporal y espacial durante el evento.

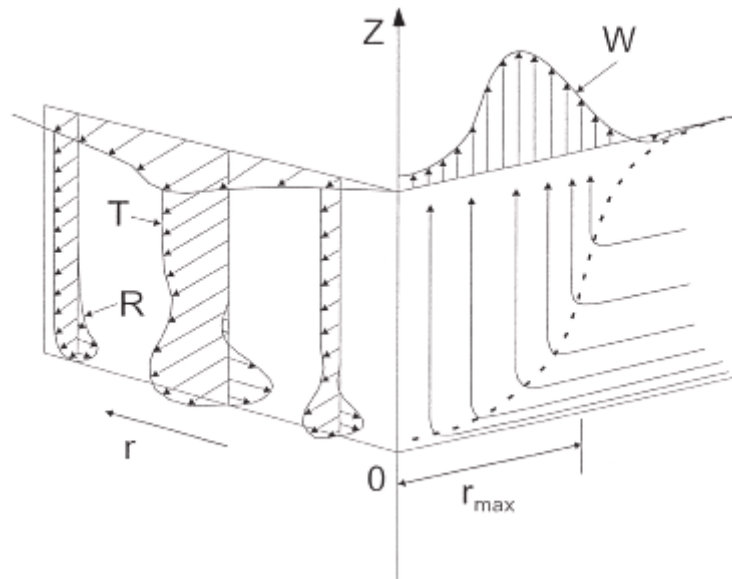


Figura 2. 4 Estructura básica del perfil de velocidades del viento para tornados. (R= Componente radial, T= Componente tangencial, W= Componente vertical) (Savory et al., 2000).

2.3.3 Tormentas severas o vaguadas

Son una fuerte corriente descendente que resulta en una ráfaga hacia fuera de vientos muy dañinos sobre o cerca del suelo. Las vaguadas pueden producir daños similares a un fuerte tornado. Aunque usualmente se asocian a tormentas, las vaguadas pueden ocurrir con chubascos demasiado débiles como para producir truenos.

Las vaguadas se forman al descender aire frío desde los niveles más altos y medios de una tormenta a una velocidad mínima de 32 km/h, o cuando la precipitación o granizo se evapora o derrite, según sea el caso, en aire más seco.

El aire frío es más denso que el aire caliente, por lo que se hunde en el suelo. Cuando el aire frío choca con la superficie de la Tierra, se esparce formando un “frente de ráfagas” y comienza a girar. El aire caliente asciende a lo largo del eje delantero de “frente de ráfagas”. Mientras el aire frío gira hacia afuera, es comprimido ocasionando que los vientos aumenten dramáticamente. El proceso de formación de una vaguada es representado en la Figura 2. 5.

Las vaguadas pueden clasificarse en dos grandes categorías:

- **“Macroburst”**: tienen un diámetro mayor a 4 km. Tiene una duración de 5 a 30 minutos y la velocidad del viento suele ser mayor a 215 km/h.
- **“Microburst”**: con un diámetro menor a 4 km. Tiene una duración de 5 a 15 minutos y la velocidad del viento suele ser mayor a 270 km/h

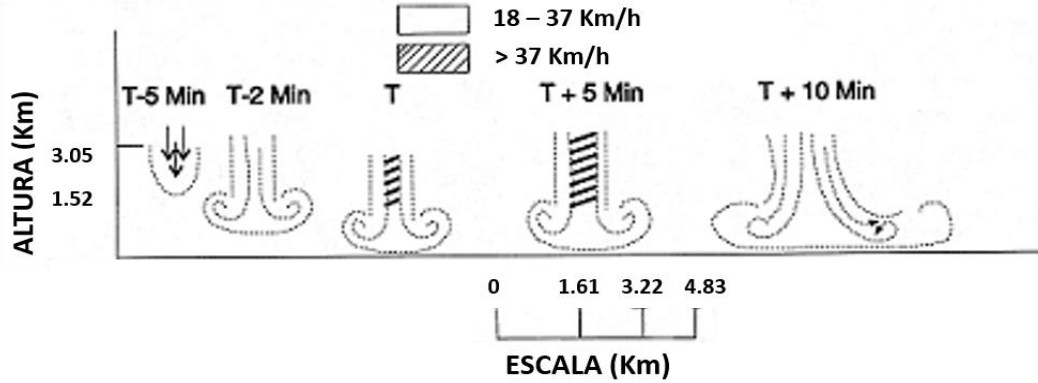


Figura 2. 5 Proceso de formación de una vaguada (National Weather Service, 2009)

2.3.3.1 Variación de la velocidad con la altura

Existen en la literatura dos modelos simplificados para el campo de velocidades de viento en una vaguada, el denominado “Vórtice de anillo” y el modelo “Wall Jet”. Sin embargo este último representa mejor el perfil de velocidades del viento y se ajusta a los datos obtenidos de pruebas a gran escala.

Savory (2000) obtuvo una ecuación que representa la variación de la velocidad del viento con la altura (z) usando un perfil vertical con una velocidad horizontal radial media (U), la cual se representa como:

$$\frac{U}{U_{max}} = e^{\left(-0.15\frac{z}{z_{max}}\right)} - e^{\left(-3.2175\frac{z}{z_{max}}\right)} \quad \text{Ec. 2. 1}$$

Donde, para cualquier distancia radial desde el centro de la tormenta, U_{max} es la velocidad radial horizontal máxima sin que se llegue a la altura máxima z_{max} , que por lo general es cerca de 60 metros. El perfil que rige esta ecuación es ilustrado en la Figura 2. 6.

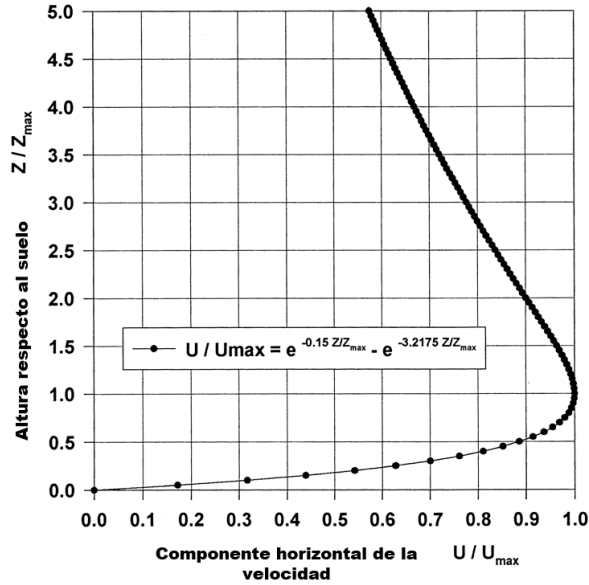


Figura 2. 6 Perfil de velocidades de una vaguada (Savory et al., 2000).

2.4 MAPAS DE VELOCIDADES DE VIENTO

En esta sección se describe el procedimiento propuesto por Avelar (2006) para obtener los mapas de velocidades de viento ocasionados por un huracán en un punto a una distancia, r , del ojo del huracán en el territorio mexicano. Sin embargo la elaboración de mapas digitales de velocidades de viento está fuera del alcance de esta tesis.

Son pocos los estudios que se han orientado a la caracterización de los vientos huracanados que afectan a la República Mexicana (Sánchez- Sesma *et al.* 1988, Silva *et al.* 2002, Avelar 2006), en buena medida a la falta de información y de datos confiables medidos en campo. Sin embargo se han empleado modelos numéricos que permiten determinar las condiciones costeras debidas a la presencia de huracanes, siendo los de tipo paramétrico los que más éxito han tenido (Instituto de Ingeniería, 2010).

Los modelos paramétricos de presión y viento dependen de la información siguiente: posición del ojo del huracán, presión central, velocidad máxima de viento sostenida en el ojo del huracán y radio ciclostrofico, conocido también como radio de máximo gradiente. Todos estos parámetros pueden ser encontrados en boletines climatológicos

La velocidad del viento evaluada a diez metros sobre el nivel del mar, en km/h, para un ciclón en movimiento y para una distancia r medida desde el centro del ciclón, está dada por la Ec. 2. 3 (Silva *et al.*, 2020).

$$W = 0.886(F_v U_R + 0.5V_F \cos(\theta + \beta)) \tag{Ec. 2. 2}$$

donde

W = Velocidad del viento sostenida a 10 metros sobre el nivel del mar.

V_F = Velocidad de desplazamiento del huracán.

$(\theta + \beta)$ = ángulo formado por la dirección de desplazamiento del ciclón y un punto a una distancia r .

$F_v = U_r/U_R$, relación de la velocidad de viento a una distancia radial r y el máximo gradiente de vientos; el cual se calcula mediante la calibración del modelo para ser empleado en las costas mexicanas, con la siguiente ecuación (Silva *et al.*, 2020):

$$\log_{10}(F_v) = aX + bX^2 + cX^3 + dX^4 \quad \text{Ec. 2. 3}$$

en donde: $X = \log_{10}(r/R)$, los coeficientes a , b , c y d se obtienen de la Tabla 2. 5.

Tabla 2. 5 Parámetros a , b , c y d para el cálculo de la Ec. 2. 3.

$X \leq 0$	$X > 0$	
	$Nc \leq 0.005$	$Nc > 0.005$
$a = -0.233$	$0.033 - 16.1Nc + 161.9Nc^2$	$-0.175 - 0.76Nc + 11.7Nc^2 - 28.1Nc^3 + 17Nc^4$
$b = -12.91$	$-0.43 + 38.9Nc - 316Nc^2$	$0.235 + 2.71Nc - 67.6Nc^2 + 189Nc^3 - 155Nc^4$
$c = -19.38$	$0.113 - 28.6Nc + 71.1Nc^2$	$-0.468 - 9Nc + 87.8Nc^2 - 224Nc^3 + 183Nc^4$
$d = -8.311$	$1.818Nc + 80.6Nc^2$	$0.082 + 3.33Nc - 26Nc^2 + 63.8Nc^3 - 51.4Nc^4$

Nc de la Tabla 2. 5 es el número de Coriolis ciclostrófico,

$$Nc = \frac{fR}{U_R} \quad \text{Ec. 2. 4}$$

El máximo gradiente de vientos U_R (en km/h), para un ciclón estacionario puede ser evaluado a través de la siguiente relación:

$$U_R = 21.8\sqrt{P_N - P_o} - 0.5fR \quad \text{Ec. 2. 5}$$

donde: f es parámetro de la fuerza de Coriolis, la cual se representa de la siguiente manera:

$$f = 2\omega \sin \phi \quad \text{Ec. 2. 6}$$

donde ω es la velocidad angular de la tierra, la cual es aproximadamente $\omega \approx 0.2618$ rad/h, y ϕ es la latitud.

Para determinar el radio ciclostrófico se utiliza la siguiente expresión (Silva *et al.*, 2002):

$$R = 0.4785 P_o - 413.01 \quad \text{Ec. 2. 7}$$

en donde : R = radio ciclostrófico (km)

P_o = presión central (mb)

En los casos donde no se reporta la presión central en los boletines de los huracanes, se emplean las siguientes ecuaciones (Silva *et al.*, 2020):

Océano Atlántico:

$$P_0 = 1019.08 - 0.182V_v - 0.0007175V_v^2 \quad \text{Ec. 2. 8}$$

Océano Pacífico:

$$P_0 = 1017.45 - 0.1437V_v - 0.00088V_v^2 \quad \text{Ec. 2. 9}$$

En donde V_v es la velocidad máxima de viento sostenida en km/h y P_0 en mb.

Una vez obtenida la velocidad del viento en un punto en específico se debe efectuar el cambio entre tiempos de promediación, ya que el modelo está calibrado para un tiempo de 8 minutos y el de los boletines meteorológicos se reporta a 1 minuto. Las ecuaciones Ec. 2. 10 y Ec. 2. 11 (Avelar, 2006) relacionan la velocidad reportada en los boletines con la velocidad obtenida con el modelo paramétrico.

$$V_c = 0.0012V_m^2 + 1.1114V_m \quad \text{Para el Océano Atlántico} \quad \text{Ec. 2. 10}$$

$$V_c = 0.002V_m^2 + 0.9953V_m \quad \text{Para el Océano Pacífico} \quad \text{Ec. 2. 11}$$

en donde:

V_c = Velocidad máxima de viento, en km/h.

V_m = Velocidad obtenida con el modelo paramétrico W , en km/h.

Con el objetivo de tomar en cuenta la variación de la velocidad de viento en tierra, se calculó una expresión (Avelar, 2006) que permite reproducir la velocidad de viento registrada en las Estaciones Meteorológicas (promediada a cada 3 segundos) a partir de la velocidad de viento calculada con el modelo paramétrico. La expresión obtenida es la siguiente:

$$V_v = V_c \exp(-0.0043r) \quad \text{Ec. 2. 12}$$

En donde:

r = Distancia del ojo del huracán al sitio de interés, en m.

Una vez obtenida la velocidad de viento a 3 segundos, se utiliza la metodología propuesta por el Manual de Obras Civiles de la CFE para obtener velocidades de diseño afectadas por factores de topografía y rugosidad (MDOC-DV, 1993):

$$V = F_T F_\alpha V_v \quad \text{Ec. 2. 13}$$

donde:

V = velocidad de viento para una ubicación específica en tierra.

V_v = Velocidad de viento a 10m sobre la superficie del terreno, actuando en una zona libre de obstáculos.

F_T = factor de topografía local.

F_α = factor que toma en cuenta el efecto combinado de las características de exposición locales, el tamaño de la construcción y la variación de la velocidad con la altura, donde:

$$F_\alpha = F_c F_{rz} \quad \text{Ec. 2. 14}$$

siendo:

F_c = factor que determina la influencia del tamaño de la construcción, para el cual se asume un valor igual a 1.0, por lo que $F_\alpha = F_{rz}$.

F_{rz} = factor que determina la variación de la velocidad del viento con la altura, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$F_{rz} = 1.56 \left(\frac{10}{\delta} \right)^\alpha \quad \text{si } Z \leq 10 \text{ m}$$

$$F_{rz} = 1.56 \left(\frac{Z}{\delta} \right)^\alpha \quad \text{si } 10 < Z < \delta$$

$$F_{rz} = 1.56 \quad \text{si } Z \geq \delta$$

Ec. 2. 15

donde:

Z = altura (en metros) a la cual se desea determinar la velocidad de viento.

Se representan los perfiles de viento para los tipos de terreno 2, 3 y 4 en la Figura 2. 7.

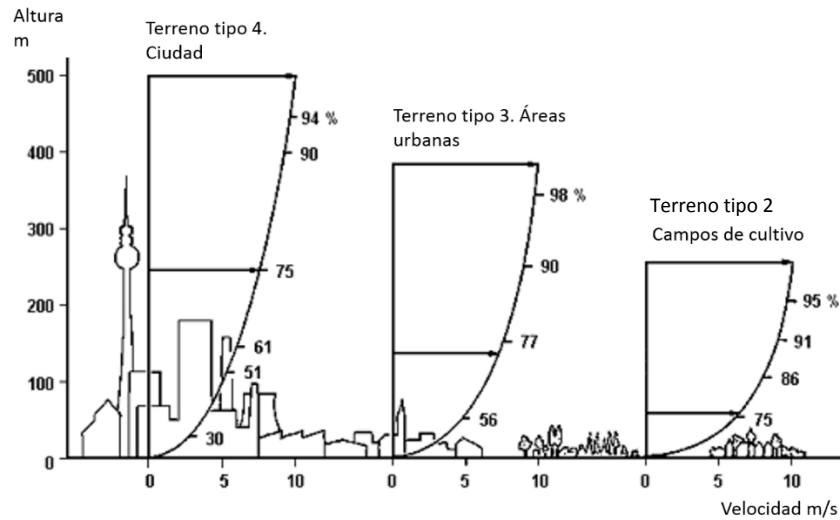


Figura 2. 7 Perfiles de viento para diferentes tipos de terreno.

Para los tipos de terreno más representativos de nuestro país y el factor de topografía, se utilizaron los valores propuestos por el Manual de Construcción de Obras Civiles de la CFE.

Se calcularon para todo el país las áreas de exposición por viento para asignar factores de topografía (F_T) considerando un km de distancia y 5% de pendiente para determinar la variación de la topografía.

La velocidad obtenida con la Ec. 2. 12, debe corregirse con un factor de atenuación de la velocidad que considere el efecto de las montañas y cordilleras, F_M , si el lugar se encuentra por arriba de los 200 m (Ec. 2. 16).

$$F_M = 0.8 + 0.2 \exp\left(-\frac{Z}{600}\right)^2 \quad \text{Ec. 2. 16}$$

Donde Z es la altura del lugar, en metros.

Para cada evento se tiene un mapa de velocidades de viento máximas en un punto específico. Se observa en la Figura 2. 8 los campos de velocidades para el país presentadas con el huracán Gilberto obtenidos con el programa ERN-Huracán (ERN-LA *et al.*, 2009).

Así mismo se generan huracanes artificiales o familia de huracanes, para ello se utiliza el método de perturbar las trayectorias de huracanes reales que hayan sido correcta y completamente registrados (Avelar, 2006).

Para simular la trayectoria de un huracán se debe precisar la posición mediante sus coordenadas geográficas de longitud y latitud, $x_s(t_k)$ y $y_s(t_k)$, respectivamente, en cada instante de tiempo k . El proceso de simulación se debe realizar mediante la siguiente expresión, aplicable al caso de la longitud, y con un procedimiento similar para el caso de latitud.

$$x_s(t_{k+1}) = x_s(t_k) + \Delta x_{k,k+1} + e \quad \text{Ec. 2. 17}$$

Donde $x_s(t_{k+1})$ es la longitud en el instante $k + 1$, $x_s(t_k)$ es la longitud en el instante k , $\Delta x_{k,k+1}$ es el incremento observado entre los instantes k y $k + 1$ y e es una variable aleatoria con distribución normal de media cero y desviación estándar $\sigma = 0.5$.

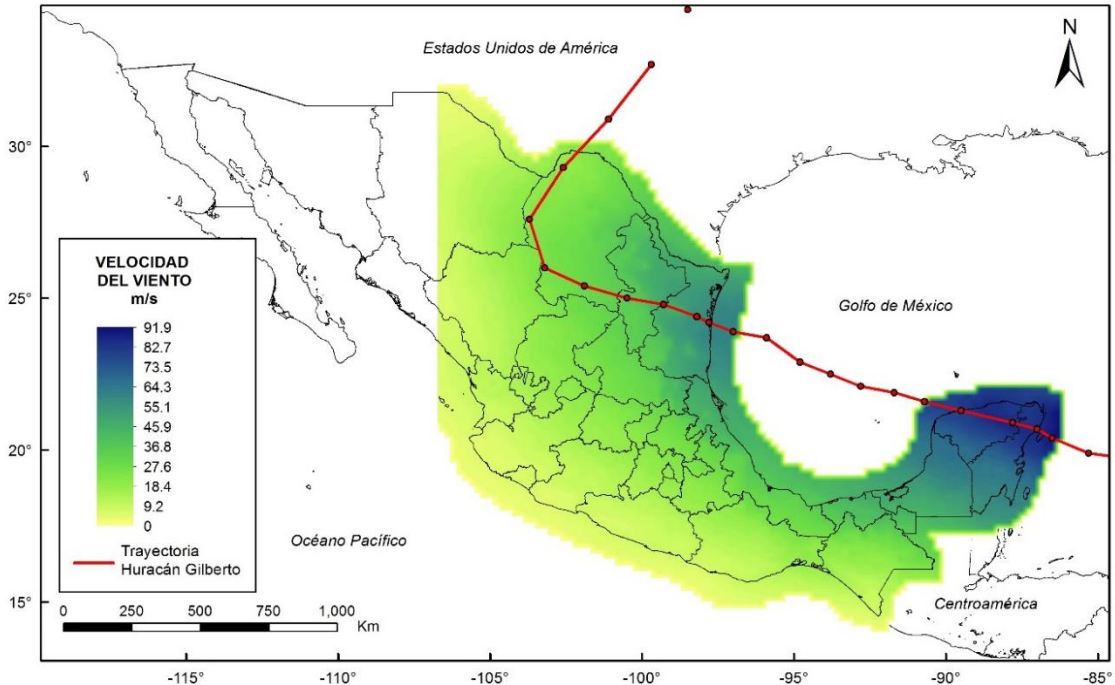


Figura 2. 8 Mapa de velocidades para un evento.

2.5 REPRESENTACIÓN DIGITAL DE LA AMENAZA

Para el proceso del cálculo del riesgo en el programa CAPRA (ERN-LA *et al.*, 2011), los resultados del análisis de amenaza se almacenan en archivos con un formato tipo “AME”, los cuales se encuentran en formato raster. Este último es una estructura de datos que representa una malla rectangular de pixeles o celdas, cada una con un valor determinado.

En los centros poblados se recomienda una dimensión mínima de análisis de la malla en el orden de 1 a 3 km. Para zonas rurales poco habitadas el tamaño máximo de la malla debe ser del orden de los 10 km, aunque cada caso particular definirá los requerimientos de densidad de mallado.

Los archivos AME describen la frecuencia anual del escenario y la distribución espacial de las intensidades producidas durante la ocurrencia del escenario. La intensidad es tratada como una variable aleatoria y es descrita mediante dos momentos estadísticos de una distribución de probabilidad (normal, lognormal, beta y gamma) (ERN-LA, 2011).

2.6 ESCENARIOS ELEGIDOS PARA EL CÁLCULO DEL RIESGO EÓLICO

Para el cálculo probabilista del riesgo eólico de las líneas de transmisión en México se consideran todos los escenarios que componen la amenaza del lugar, huracanes desde 1864 al 2012 en el Océano Atlántico y desde 1949 al 2012 en el Océano Pacífico (Tabla A. 1).

De igual manera, se seleccionaron eventos huracanados para los cuales, CFE y el CENAPRED han reportado torres de transmisión eléctrica colapsadas y/o líneas de transmisión afectadas (Tabla 2. 6) para realizar el análisis de riesgo por escenario. También se seleccionaron eventos históricos como el huracán Gilberto, que a pesar de no tener datos precisos sobre pérdidas en México, debido a la magnitud y velocidades de viento del huracán, es altamente probable que haya generado colapsos y pérdidas en el sector eléctrico.

Tabla 2. 6 Escenarios propuestos para el análisis de riesgo eólico.

AÑO	EVENTO	FRECUENCIA	CAT	VELOCIDAD km/h
1988	Huracán Gilberto	6.71×10^{-3}	5	270
1997	Huracán Paulina	1.56×10^{-2}	4	240
2001	Depresión Juliette	1.56×10^{-2}	D.T.	< 63
2002	Huracán Isidore	6.71×10^{-3}	3	85 a 205 rachas 250
2005	Huracán Emily	6.71×10^{-3}	4	215 rachas de 260
2005	Huracán Wilma	6.71×10^{-3}	4	220 rachas 270
2007	Huracán Dean	6.71×10^{-3}	5	278
2010	Huracán Alex	6.71×10^{-3}	2	175
2012	Huracán Ernesto	6.71×10^{-3}	2	155

NOTA: D.T. = Depresión Tropical

CAPÍTULO 3

ASPECTOS GENERALES DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA

3.1 DEFINICIÓN

Una línea de transmisión eléctrica es el conjunto de dispositivos para transportar o guiar la energía eléctrica a grandes distancias, desde una fuente de generación a los centros de consumo de manera económica y eficiente.

En México los niveles de voltajes a partir de 115 kV son considerados como de líneas de transmisión. Voltajes desde 66 hasta 115 kV se consideran como una red de subtransmisión. Niveles de tensión menores a 34.5 kV están relacionados con redes de distribución.

La transmisión de dicha energía puede realizarse ya sea por corriente alterna o directa, y de acuerdo al diseño de la línea puede ser de transmisión aérea o subterránea. Las líneas de transmisión aérea son las más utilizadas debido a su bajo costo en relación a las subterráneas. Para este tipo de transmisión se necesita una estructura que soporte los cables (Figura 3. 1). Cuando las tensiones en los cables son bajas, se utilizan postes y cuando son altas se emplean torres, preferentemente de acero. También en zonas urbanas se usan postes troncocónicos de acero dado los estrechos anchos de vía.

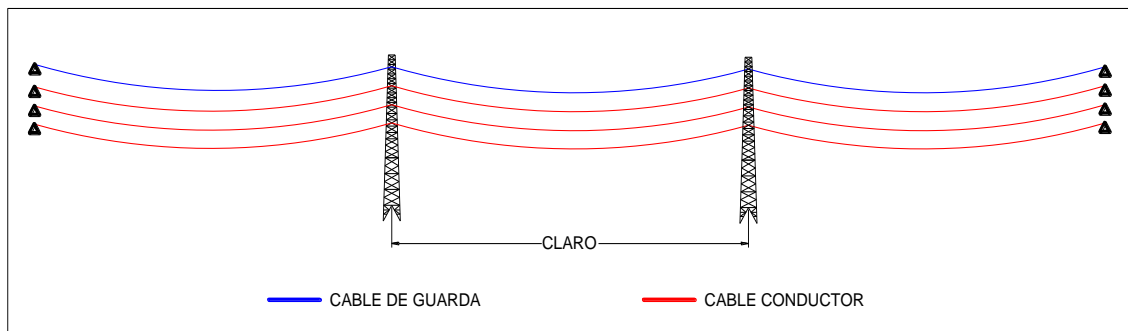


Figura 3. 1 Porción de una línea de transmisión eléctrica aérea

3.2 CLASIFICACIÓN DE TORRES DE TRANSMISIÓN

Las estructuras de soporte en las líneas de transmisión aéreas son los elementos más importantes, ya que alguna falla estructural compromete el funcionamiento de uno o varios tramos de línea. Para esta investigación, se seleccionó una torre de celosía autoportada.

La torre, sus componentes y su cimentación, deben soportar los conductores que conforman la línea y a sí misma, de tal forma que pueda cumplir con su función cumpliendo todas las especificaciones estipuladas.

Las torres metálicas de celosía se clasifican, según su ubicación a lo largo de la línea (Figura 3. 2), en los siguientes tipos:

- a) **Torres de Suspensión:** se encuentran en tramos rectos de la red. Se diseñan bajo la acción de peso propio, la acción del viento y la posible ruptura de cables.
- b) **Torres de Deflexión:** son aquellas que están dentro de la línea de transmisión y presentan ángulo de deflexión entre torres. Se consideran los estados de carga anteriores y las fuerzas adicionales generadas por el desvío en la trayectoria de la línea.
- c) **Torres de Atraque, tensión o anclaje:** en éstas se toma en cuenta la posible pérdida de fuerza en los cables ocasionada, por ejemplo, por la falla de una o varias estructuras, con la finalidad de evitar que dicha acción continúe dañando a otras torres.
- d) **Torres de Remate:** este tipo de torres son las que soportan un sólo claro. Este tipo se presenta en los puntos de inicio o término de la línea.

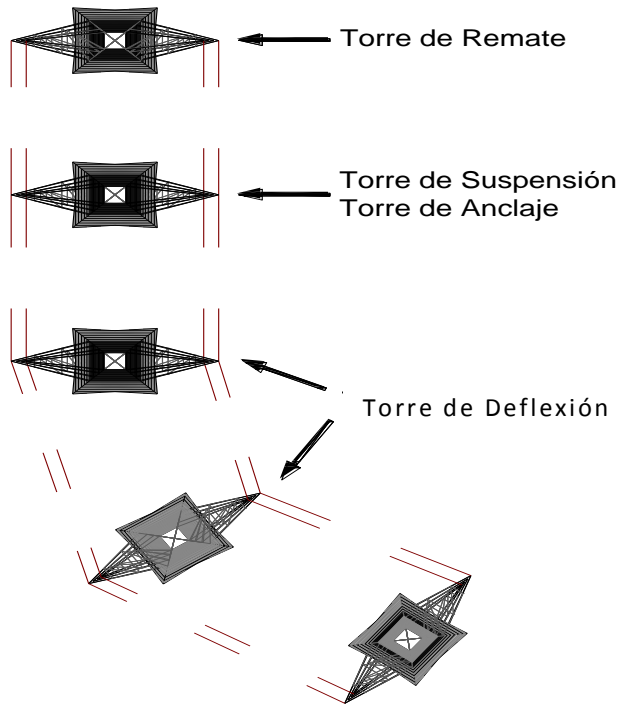


Figura 3. 2 Tipos de torres de transmisión.

Se deben considerar dos claros para el diseño y análisis de cargas generadas por los cables sobre la torre, los cuales se definen como sigue:

- a) **Claro de Viento:** se emplea para el cálculo de las fuerzas horizontales transversales debidas al viento que actúa sobre los cables. El claro de viento corresponde a la semisuma de los claros adyacentes a la torre.
- b) **Claro de Peso:** se emplea para determinar las cargas verticales debidas a la acción de la gravedad, que ejercen los cables sobre la torre. Se calcula como la semisuma de las distancias de la torre a los puntos más bajos de las catenarias de los cables adyacentes a la misma.

3.3 COMPONENTES DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA

Los componentes principales de una línea de transmisión de energía eléctrica se presentan en la Figura 3. 3 y se describen como los siguientes:

- a) **Cables:** elementos flexibles que tienen la función de conducir la energía eléctrica (conductores) o de proteger a los cables conductores contra rayos (de guarda).
- b) **Cadena de aisladores:** sirven para unir los conductores a la estructura de la torre y evitar el arco eléctrico.
- c) **Estructura de soporte:** es la estructura metálica o poste de acero que sirve de soporte para todos los demás componentes.
- d) **Herrajes:** conectan los aisladores a la estructura de soporte.
- e) **Accesorios:** forman parte las escaleras y otros elementos.

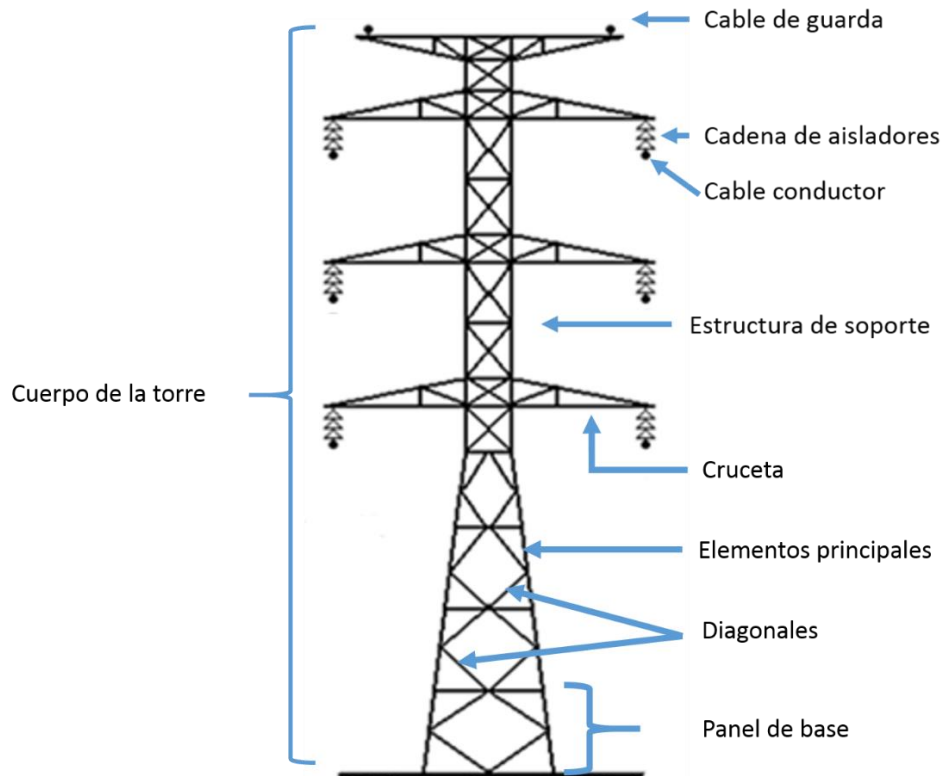


Figura 3. 3 Partes de una línea de transmisión eléctrica.

3.4 DESCRIPCIÓN DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA

Se analizó una torre de transmisión para 400 kV, de 53 metros de altura con base cuadrada, semejantes en dimensiones generales y estructuración a las torres colapsadas en la línea Nizuc - Playa del Carmen, durante el huracán Wilma, en el 2005 (Sordo – Zabay *et al.*, 2006). Se seleccionó este tipo de torre debido a la disponibilidad de información.

La torre corresponde al modelo 53T10 (Luz y Fuerza del Centro), los elementos de las torres están formados con ángulos comerciales de alta resistencia, algunos con un $f_y = 2,530 \text{ kg/cm}^2$ (acero A36) y otros con un $f_y = 3,515 \text{ kg/cm}^2$ (acero A572, grado 50), unidos con tornillos A394 (Sordo – Zabay *et al.*, 2006).

Se consideró la separación máxima entre torres de 400 m. La torre cuenta con dos circuitos, con un conductor por fase en seis crucetas para conductores con una tensión de 3,700 kg y dos para hilo de guarda tensados con 900 kg. Los conductores se consideraron del tipo ACSR 1113 con una tensión de 14043 kg y un peso de 1.87 kg/m, mientras que la tensión en el hilo de guarda es de 4900 kg, con un peso igual a 0.406 kg/m., el peso de la cadena de aisladores se supuso igual a 250 kg (Sordo–Zabay *et al.*, 2006 y Morales, 2008).

3.4.1 Torre para transmisión de energía eléctrica

La estructuración utilizada en la torre de transmisión analizada se basó en la propuesta por Morales (2008) para la torre tipo 68T10.

Los miembros de las torres de soporte están constituidos por ángulos de lados iguales, los cuales cumplen con la especificación CFE J1000 -50 (CFE, 2011 b) en dimensiones mínimas y en resistencia del material. Los elementos principales tienen un ancho mayor a 38 mm y un espesor mayor a 4.8 mm de acero estructural $f_y = 3,515 \text{ kg/cm}^2$ (345 MPa), y los elementos secundarios tienen un ancho mayor a 38 mm y un espesor mayor a 4.0 mm de acero estructural con un $F_y = 2,530 \text{ kg/cm}^2$ (250 MPa) (CFE, 2011 b).

La torre utilizada en esta tesis se dividió en 29 paneles para efectos del análisis de las cargas de viento, tal como se muestra en la Figura 3. 4; así mismo, en la Figura 3. 5 se muestra la estructuración de dichas secciones y en la Tabla 3. 1 se detallan las secciones de los elementos estructurales.

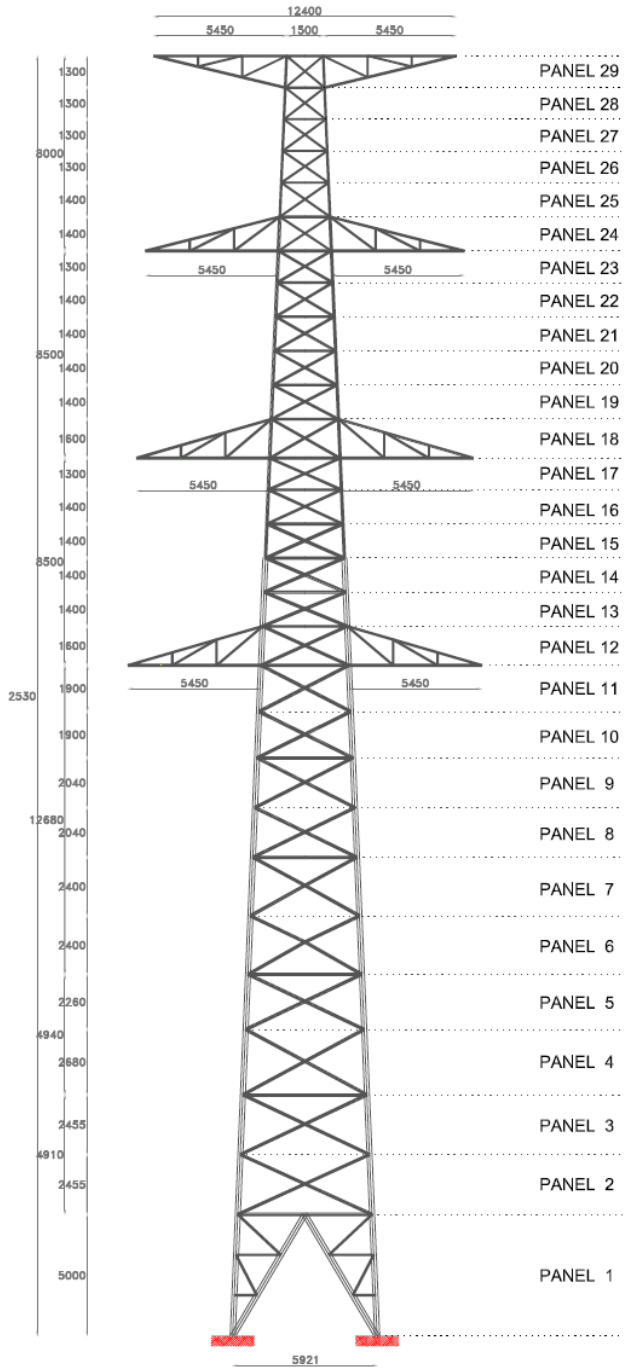


Figura 3. 4 Distribución de paneles para el cálculo de fuerzas debidas al viento.

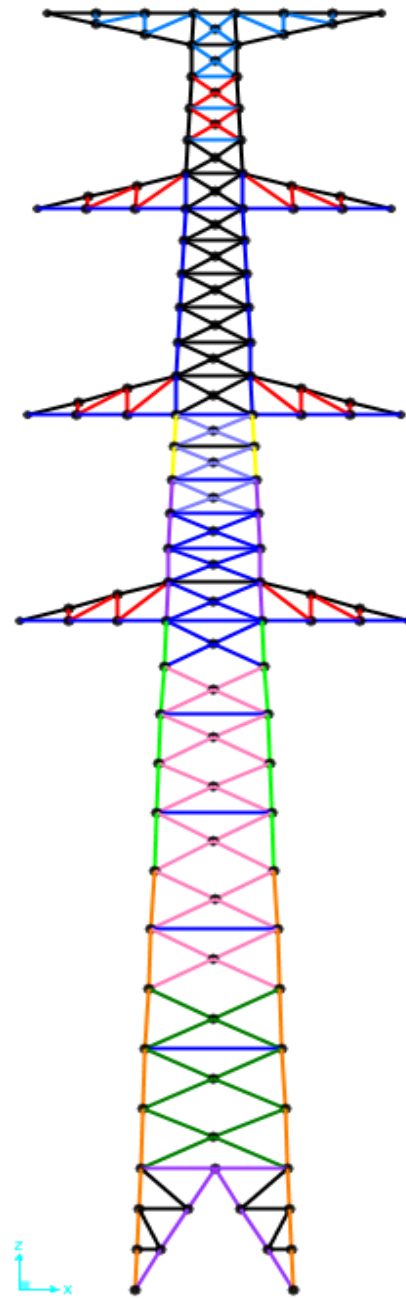
























Figura 3. 5 Estructuración para la torre de transmisión

Tabla 3. 1 Secciones estructurales.

	SECCIÓN	PERFILES	F _y kg/cm ²
	L-1	 LI 4"X1/2"	3515
	L-2	 LI 4"X3/8"	3515
	L-3	 LI 4"X3/8"	3515
	L-4	 LI 4"X1/2"	3515
	L-5	 LI 4"X3/8"	3515
	L-6	 LI 4"X3/4"	3515
	L-7	 LI 3"X3/8"	3515
	L-8	 LI 2-1/2"X1/2"	2530
	L-9	 LI 2"X1/4"	2530
	L-10	 LI 5"X1/2"	3515
	L-11	 LI 3"X1/2"	3515

Los elementos principales de la torre de transmisión como piernas, cuerdas y crucetas, tanto del cuerpo piramidal como del cuerpo recto y superestructura, se consideraron como barras con 6 grados de libertad y con capacidad de transmitir momentos. Esto es con base en los resultados obtenidos en pruebas a gran escala (Nasad Prao *et al.*, 2010 y Albermani *et al.*, 2010) los cuales demuestran que los elementos se someten a flexión tanto a carga axial. Los elementos secundarios y diagonales se tomaron como barras con 3 grados de libertad y sin capacidad de transmitir momentos.

3.4.2 Cables conductores y de guarda

En la Tabla 3. 2 se describen las características del cable conductor y en la Tabla 3. 3 las del cable de guarda que fueron utilizadas en el análisis de los mismos (Morales, 2008).

Tabla 3. 2 Especificaciones del cable conductor ASCR 1113.

Tipo	ACSR 1113	
Diámetro	0.032	m
Área transversal	8.04×10^{-4}	m ²
Peso unitario	1.87	kg/m
Tensión a la ruptura	14043.03	kgf
Módulo de elasticidad inicial	5.483×10^9	kg/m ²
Módulo de elasticidad final	6.587×10^9	kg/m ²

Tabla 3. 3 Especificaciones del cable de guarda.

Diámetro	0.0095	m
Área transversal	7.09×10^{-5}	m ²
Peso unitario	0.406	kg/m
Tensión a la ruptura	4900	kgf
Módulo de elasticidad inicial	15.747×10^9	kg/m ²
Módulo de elasticidad final	18.137×10^9	kg/m ²

3.4.2.1 Características geométricas de los cables

Es preciso conocer las características geométricas de los cables y así obtener el cálculo de las tensiones y flechas de los mismos, para ello se recurre a la configuración de la curva catenaria sin considerar efectos de variación de temperatura, si se aísla una porción del conductor o cable, representado como se muestra en la Figura 3. 6.

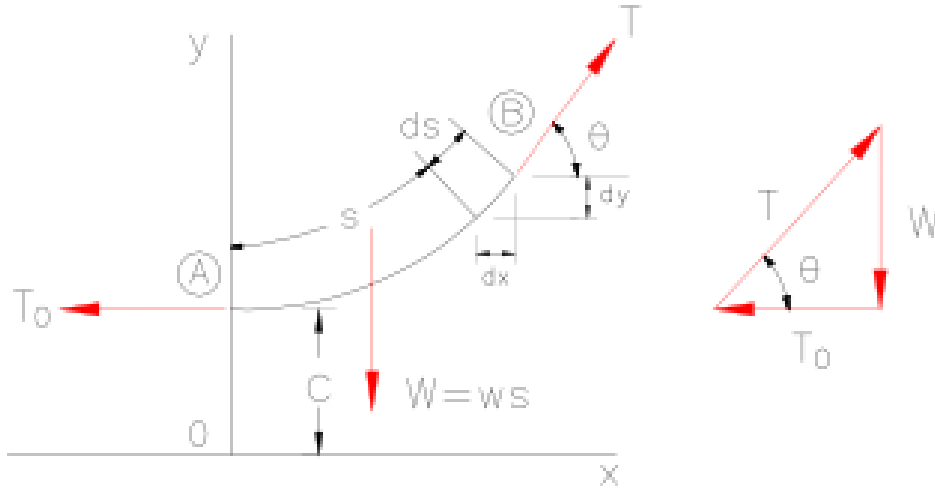


Figura 3. 6 Tensiones en una curva catenaria (Morales, 2008).

Las torres ubicadas en los extremos deberán soportar la fuerza T que ejerce el cable. Considerando un tramo de cable AB que tiene una carga uniformemente distribuida w a lo largo de la horizontal, se define en función de la fuerza de tensión que se genera en los extremos, la cual se calcula con:

$$T = w\sqrt{c^2 + s^2} \tag{Ec. 3. 1}$$

Donde

$$s = c \operatorname{senh} \frac{x}{c} \tag{Ec. 3. 2}$$

$$y = c \operatorname{cosh} \frac{x}{c} \tag{Ec. 3. 3}$$

De igual manera, la constante $c = \frac{T_0}{w}$, y obteniendo a las expresiones $W = ws$, $T = wy$, se obtiene que la flecha del cable h está dada por la expresión:

$$h = y - c \tag{Ec. 3. 4}$$

Con base en las expresiones anteriores se obtiene la configuración geométrica de los conductores (Figura 3. 7) y cables de guarda (Figura 3. 8). Estableciéndose la tensión T en el extremo del cable como la mitad de la carga de ruptura y la distancia x igual a 200 metros, se puede definir las flechas de los cables seleccionados.

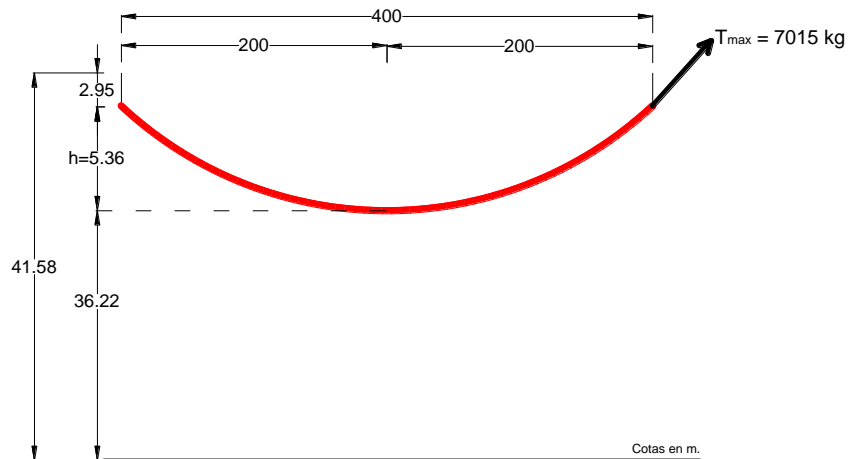


Figura 3. 7 Configuración de los cables conductores más alejados al nivel de piso.

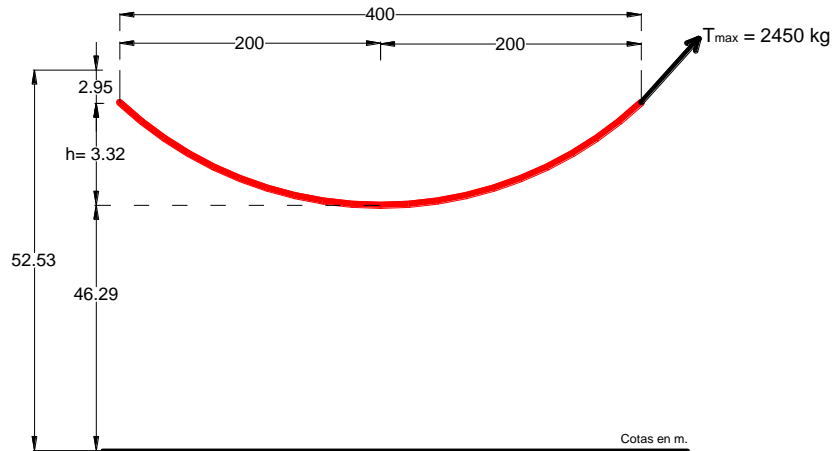


Figura 3. 8 Configuración del cable de guarda.

Los cables se modelaron con el programa SAP2000 (CSI, 2013) con el comando correspondiente para ello, proporcionando datos como la tensión actuante y la flecha máxima. Los cables se dividieron en 100 puntos de integración para aligerar el proceso de cálculo.

3.4.3 Herrajes

Con base en lo estipulado por la especificación CFE J1000 – 50 (CFE, 2011 b), se considera el peso de los herrajes y accesorios como el 5% del peso total de la torre distribuido de forma proporcional.

3.4.4 Aisladores

Se consideraron aisladores de suspensión en forma de “I”, cementado, de porcelana con las propiedades expresadas en la Tabla 3. 4.

Tabla 3. 4 Propiedades de la cadena de aisladores (Morales, 2008).

Longitud	2.95	m
Peso	250	kg
Resistencia a la tensión	2700	kg
Módulo de elasticidad	3.11×10^6	kg/cm ²

3.5 REPRESENTACIÓN DIGITAL DE LOS BIENES EXPUESTOS

La valoración del riesgo de infraestructura expuesta exige la conformación de una adecuada base de datos georreferenciada de activos en una determinada zona, para la cual se tenga información de los fenómenos naturales que puedan producir o han producido daños en dicha infraestructura.

Los elementos expuestos, que pueden ser componentes de obras de infraestructura, sus contenidos y ocupantes de la infraestructura o los habitantes de las poblaciones, se representan en un archivo tipo “Shape” que se genera a partir de una compilación de datos y características de dichos elementos.

Un archivo Shape se compone por varios archivos, sin embargo el mínimo requerido es de tres con las extensiones siguientes:

1. **.shp.** Es el archivo que almacena las entidades geométricas de los objetos, pudiendo ser puntos, líneas o polígonos.
2. **.shx.** Es el archivo que almacena el índice de las entidades geométricas.
3. **.dbf.** El dBASE, o base de datos, es el archivo que almacena la información de los atributos de los objetos.

En particular, el inventario de activos debe incluir información referente a los siguientes temas específicos:

- Identificador de la estructura o propiedad.
- Ubicación en términos de coordenadas geográficas.
- Caracterización geométrica en planta del bien.
- Costo de reposición del bien.
- Ocupación humana.
- Nombre que caracteriza la vulnerabilidad del bien. La vulnerabilidad debe especificarse en términos del daño físico (incluidos los contenidos) y/o en términos de la afectación humana (normalmente el número esperado de víctimas) en caso de ser necesario, como función de la intensidad seleccionada para el fenómeno amenazante.

Los requerimientos mínimos de información para las líneas de transmisión eléctrica se definen como los siguientes:

- Número de referencia.
- Referencia de la ubicación geográfica en municipio y/o estado.
- Ubicación geográfica en coordenadas.

- Características de la estructura de soporte: tipo de torre (autosoportada o con retenidas), base (triangular, rectangular o cuadrada) y tipo de sección de elementos (planos o circulares).
- Voltaje.
- Número de circuitos y número de cables por fase.
- Velocidad de diseño.
- Costo de reposición.
- Referencia de la función de vulnerabilidad estructural y humana.

Los datos se organizan en una hoja de Excel (Microsoft Corp., 2012), tal como se muestra en la Figura 3. 9. Cada columna es un campo que caracteriza la exposición con fines de estimación de riesgo para cada elemento como se describe en la Tabla 3. 5. La información utilizada para la generación de la base de datos fue proporcionada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2011 a).

Se pueden tener datos más específicos como la geometría de la línea de transmisión representada en líneas y así poder tener con certeza el tipo de torre para transmisión eléctrica, año de mantenimiento, entre otros, para disminuir las incertidumbres y abarcar más estados de falla.

Estas hojas de datos se procesan con un software especializado, como el ArcGis (ESRI, 2010), que las convierte en un archivo tipo Shape donde los elementos geográficos y sus datos descriptivos pueden ser visualizados como un mapa georreferenciado.

La Figura 3. 10 representa la extensión .shp y muestra la localización concentrada de las líneas de transmisión en México a manera de puntos, correspondiente a la base de datos proporcionada.

	Identificador	Referencia de ubicación geográfica		Ubicación geográfica		Características del bien expuesto				Valor de reposición	Afectación humana	Vulnerabilidad	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	ID	ESTADO	MUNICIPIO	POINT_X	POINT_Y	No_TORRES	TIPO_TORRE	BASE	TIPO_ELE	VEL_DIS	VAL_FIS	VAL_HUM	SE_VIENTO
2	1.00	Hidalgo	Tulancingo de Bravo	-98.350939	20.123601	162.00	Autosoportada	Cuadrada	Planos	115.00	419964.30	0.00	MEX_TR_ANT...
3	2.00	Hidalgo	Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero	-98.392777	20.035651	77.00	Autosoportada	Cuadrada	Planos	115.00	419964.30	0.00	MEX_TR_ANT...
4	3.00	Puebla	Ahuazotepec	-98.133623	20.061164	203.00	Autosoportada	Cuadrada	Planos	115.00	419964.30	0.00	MEX_TR_ANT...

Figura 3. 9 Información de la base de datos utilizada.

Tabla 3. 5 Campos y tipos de datos que contiene el archivo shape.

IDENTIFICADOR	DESCRIPCIÓN	TIPO DE DATO
ID	Número identificador	Texto
ESTADO	Nombre del estado	Texto
MUNICIPIO	Nombre del municipio	Texto
POINT_X	Coordenada de longitud	Número
POINT_Y	Coordenada de latitud	Número
No_TORRES	Total de torres en el municipio	Número
TIPO_TORRE	Tipo de torre de celosía: autosoportada o con retenidas	Texto
BASE	Geometría de la base de la torre	Texto
TIPO_ELE	Tipo de elementos que componen la torre: planos o circulares	Texto
VEL_DIS	Velocidad de diseño	Número
VAL_FIS	Valor económico de reposición de la estructura	Número
VAL_HUM	Afectación humana directa	Número
SE_VIENTO	Función de vulnerabilidad de viento para el sistema estructural	Texto

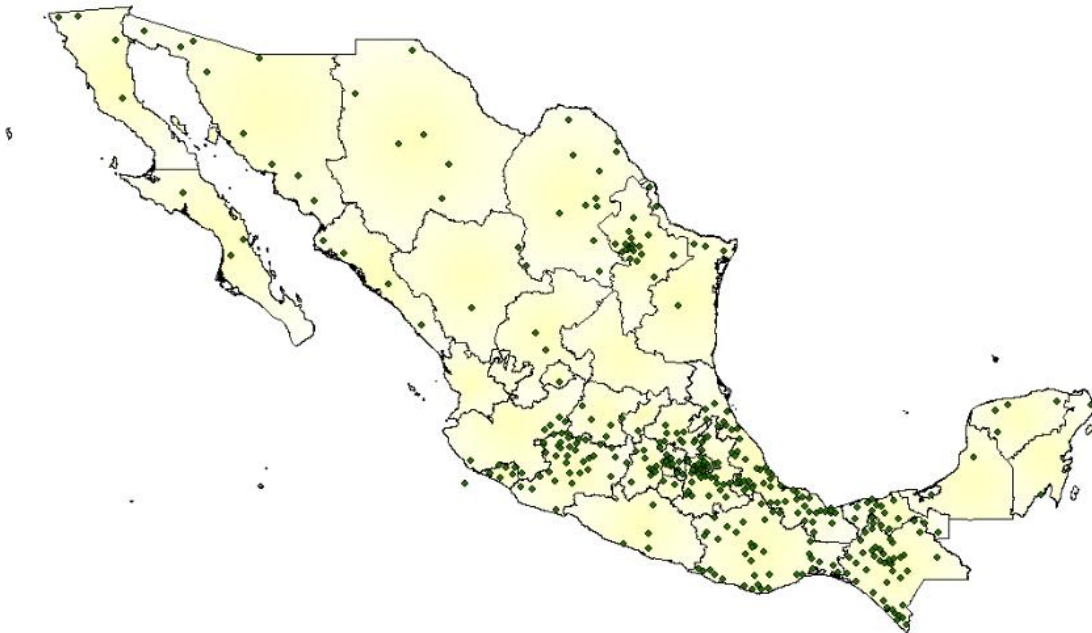


Figura 3. 10 Localización de infraestructura expuesta (CFE, 2011 a)

Con estos datos complementados con la información correspondiente a las amenazas y la información asociada a una función de vulnerabilidad determinada de daño físico y una función de vulnerabilidad de afectación humana, quedan definidos de manera completa los parámetros para la evaluación del riesgo.

CAPÍTULO 4

VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA ANTE ACCIONES DEL VIENTO

4.1 GENERALIDADES

4.1.1 Definición

La vulnerabilidad estructural se puede definir por un índice de daño, o por una probabilidad de falla, en función de la intensidad del peligro considerado, el cual podría ser la aceleración del suelo para un sismo, la velocidad de viento de un huracán o tirante de agua en el caso de inundaciones. La vulnerabilidad puede considerarse como un elemento del riesgo de la estructura, por lo mismo, no depende del lugar de exposición, efectos de sitio o características de la misma amenaza.

Los conceptos de vulnerabilidad y fragilidad se usan frecuentemente en forma indistinta, pues ambos describen la susceptibilidad de una estructura al daño. La diferencia radica en que la vulnerabilidad se relaciona a un estado límite de daño, mientras que la fragilidad tiende a aplicarse al estado límite de colapso.

La caracterización de la vulnerabilidad se realiza mediante funciones o curvas que relacionan el nivel de daño con la intensidad de la amenaza. Cada función de vulnerabilidad está representada por un valor medio y una varianza, con lo cual es posible estimar su función de probabilidad.

4.1.2 Tipos de vulnerabilidad

Se pueden identificar tres tipos de vulnerabilidad respecto al tipo de afectación que se presenta:

1. **Vulnerabilidad física.** Se refiere al daño que sufrirá un activo determinado, pudiendo presentarse un daño estructural o no estructural. La vulnerabilidad estructural se refiere al daño en sistemas primarios y cimientos, encargados de absorber cargas gravitacionales y laterales (columnas, losas, vigas, muros de cortante). La vulnerabilidad no estructural se refiere al daño en elementos arquitectónicos, recubrimientos, instalaciones, equipos y contenidos.
2. **Vulnerabilidad humana.** Hace referencia al nivel de afectación de los ocupantes en términos del número esperado de víctimas y/o heridos.
3. **Vulnerabilidad administrativa y funcional.** Se refiere a las pérdidas debidas al lucro-cesante o interrupción del funcionamiento del bien expuesto o de un servicio.

4.1.3 Factores que afectan la vulnerabilidad

La vulnerabilidad de un activo ante efectos del viento depende de factores internos y externos al mismo, debido a la naturaleza cambiante de las fuerzas generadas por el viento y a la interacción fluido – estructura.

Se debe tener presente que:

- a) La velocidad del viento cambia con la altura y el tipo de rugosidad del terreno, así como de la densidad del aire.
- b) La fuerza del viento depende de la proyección del área proyectada en un plano perpendicular a la dirección del viento y de la forma de la estructura.
- c) El viento ejerce fuerzas de presión directa en las caras expuestas (superficie de barlovento) y succión en las posteriores (superficie de sotavento).
- d) Se generan empujes dinámicos debido al flujo turbulento del viento y respuesta dinámica de la estructura.
- e) Se presentan vibraciones transversales y fenómenos aeroelásticos para geometrías particulares de las estructuras e interacción fluido – estructura.

Los factores más importantes que afectan la vulnerabilidad de las estructuras ante el viento se representan en la Figura 4. 1.

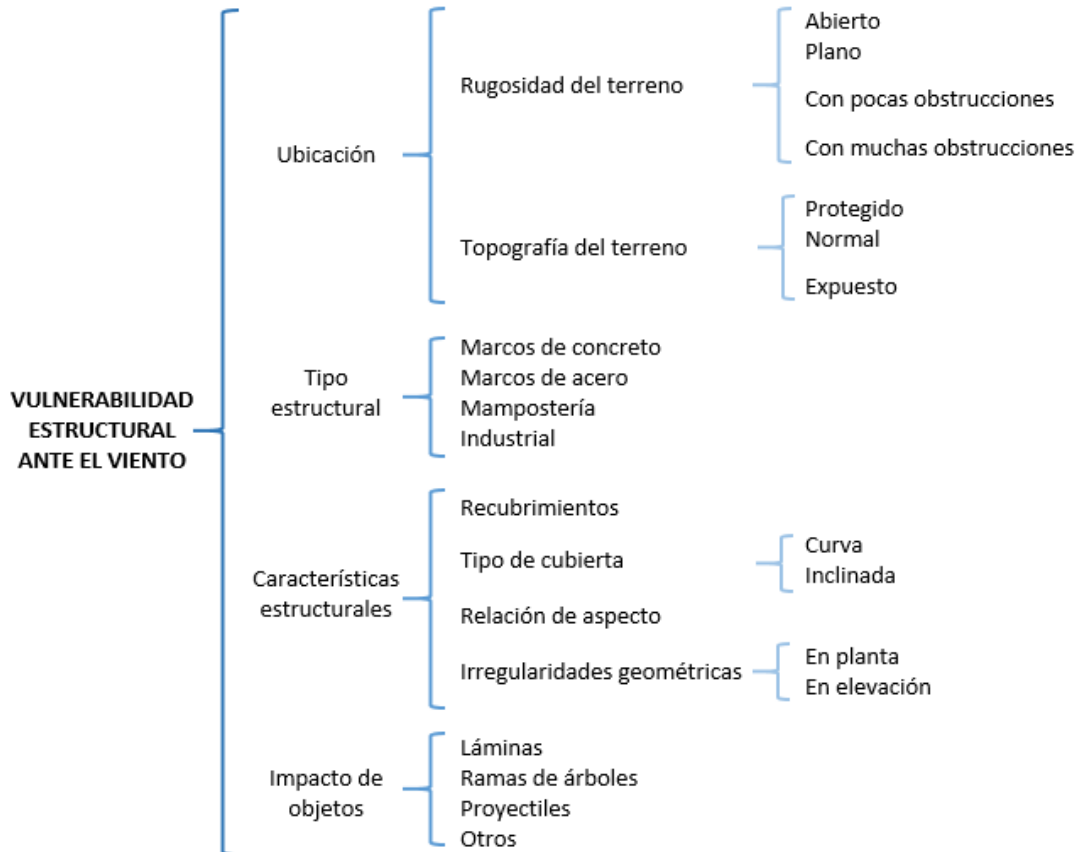


Figura 4. 1 Factores que intervienen en la vulnerabilidad eólica.

4.1.4 Funciones de vulnerabilidad

La estimación de la afectación o daño se mide en términos de la Relación Media de Daño (en inglés *Mean Damage Ratio*, MDR). Se define como la relación entre el costo esperado de reparación del elemento afectado y el costo de reposición del mismo.

La función o curva de vulnerabilidad se define como la relación entre la RMD o el daño esperado dada una intensidad, $E(\beta|I)$, y el parámetro de intensidad seleccionado para el evento en consideración, más la curva equivalente para la varianza de cada uno de los valores de pérdida (ERN-LA, 2011). Adicionalmente se debe plantear la desviación estándar de la función de vulnerabilidad tal como se presenta en la Figura 4. 2 considerando la distribución de probabilidad de daño como tipo Beta.

Las funciones de vulnerabilidad no son deterministas, por lo que el daño bruto, β , dado una intensidad, I , es una variable aleatoria. Considerando la vulnerabilidad posee una densidad de probabilidad tipo Beta y la varianza de la pérdida se puede obtener utilizando la expresión asignada en el estudio clásico del informe ATC-13 (ERN-LA, 2011) de la manera siguiente.

$$\sigma^2_{\beta}(\beta|I) = Q(E(\beta|I))^{r-1}(1 - E(\beta|I))^{s-1} \quad \text{Ec. 4. 1}$$

Donde

$$Q = \frac{\sigma^2_{max}}{D_0^{r-1}(1 - D_0)^{s-1}} \quad \text{Ec. 4. 2}$$

$$s = \frac{r - 1}{D_0} - r + 2 \quad \text{Ec. 4. 3}$$

Donde

σ^2_{max} = Varianza máxima.

D_0 = Nivel de daño para el que ocurre la varianza máxima.

r = Valor tomado igual a tres.

La distribución de probabilidades de daño bruto se puede obtener mediante la ecuación Ec. 4. 4 (ERN-LA, 2011)

$$p_{B|I}(\beta) = \frac{\Gamma(a + b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} \beta^{a-1}(1 - \beta)^{b-1} \quad \text{Ec. 4. 4}$$

En donde a y b son parámetros que pueden calcularse a partir de la media y el coeficiente de variación de daño, $C(\beta)$, de la siguiente manera (ERN - LA, 2011):

$$a = \frac{1 - E(\beta|I) - E(\beta|I)C^2(\beta)}{C^2(\beta)} \quad \text{Ec. 4. 5}$$

$$b = a \left[\frac{1 - E(\beta|I)}{E(\beta|I)} \right] \quad \text{Ec. 4. 6}$$

$$C^2(\beta) = \left[\frac{\sigma_{\beta}^2(\beta|I)}{E(\beta|I)} \right]$$

Ec. 4. 7

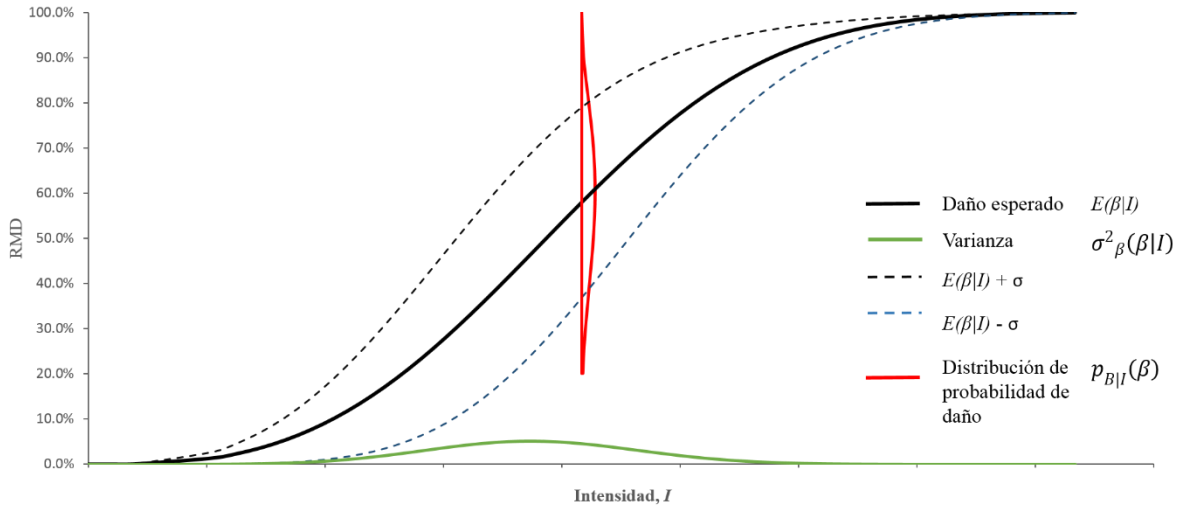


Figura 4. 2 Función o curva de vulnerabilidad tipo (ERN-LA, 2011).

4.2 EFECTO DEL VIENTO EN TORRES DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA

Las torres para transmisión eléctrica están sujetas a diferentes eventos meteorológicos que ocasionan fuertes vientos, como huracanes, tornados y vaguadas. Es por ello que se debe tener consideración de los efectos del viento sobre estas estructuras para poder garantizar su seguridad y diseño económico sin comprometer el buen funcionamiento de las mismas ante dichos eventos.

Existen diferencias importantes entre la respuesta de una torre de transmisión eléctrica de alto voltaje y otras estructuras (Holmes, 2001):

- Están estructuradas con márgenes de seguridad menores que los usados, generalmente, para otras estructuras.
- La longitud de una línea de transmisión es relevante cuando se considera la probabilidad y el riesgo de ser impactada por vientos severos provocados por huracanes, y menos probable por tornados y vaguadas.

Afortunadamente, la respuesta resonante no representa un mayor problema para este tipo de estructuras. Aunque las líneas de transmisión suelen tener una frecuencia natural menor a un Hz, la respuesta resonante es usualmente amortiguada por el amortiguamiento aerodinámico (Holmes, 2001).

Las torres mayores a 50 metros de altura, normalmente poseen una frecuencia mucho mayor a un Hz, por lo tanto la respuesta resonante se puede despreciar. Sin embargo, exceptuando torres muy altas y de largos claros, se puede obtener la respuesta pico de una línea de transmisión, omitiendo la respuesta resonante. Por lo tanto, la respuesta pico está directamente relacionada con las

velocidades de ráfaga, es por ello que las torres de transmisión pueden diseñarse con las velocidades de ráfaga (Holmes, 2001).

En México, la Comisión Federal de Electricidad (CFE), propone calcular el efecto del viento sobre las líneas de transmisión analizando por separado las torres de soporte y los cables que la componen. Se obtiene entonces una respuesta estática que luego es afectada por un factor de amplificación dinámica que considera los efectos del viento turbulento sobre la estructura.

Las fuerzas del viento actuantes en una torre de transmisión dependen de la relación de solidez de las mismas. A valores menores de la relación de solidez, mayor coeficiente de arrastre, debido a que mientras más aberturas y espacios se encuentren en el área en elevación, los elementos que la componen tienden a comportarse como elementos aislados (Holmes, 2001).

4.3 FALLAS COMUNES EN TORRES DE TRANSMISIÓN

Las torres de transmisión eléctrica fallan por muchas razones como son consideraciones incorrectas en el diseño (ignorar momentos a flexión, conexiones sólo a cortante), escasos detalles, defectos de materiales, errores de fabricación, forzado en la colocación de elementos durante la construcción, diferentes grados de atornillado, entre otros.

Las fallas estructurales generalmente se presentan en la base de la estructura; en la unión entre la cimentación y el cuerpo principal de la torre. La falla en esta zona es función del tipo de suelo de desplante, compactación del relleno y profundidad de empotramiento, de la buena atención que se tenga a estos puntos depende la rigidez del nudo que forma la cimentación con cada una de las patas de la torre (Bahena, 1996).

Se resumen las fallas estructurales en dos grupos:

- a) Falla de elementos sin desplome de la estructura (Figura 4. 3).
- b) Falla de elementos con desplome total de la estructura (Figura 4. 4).

Existen también otras fallas importantes a considerar

- a) Falla en la cimentación.
- b) Falla por capacidad de elementos estructurales.
- c) Falla por ruptura de cables.
- d) Falla por mala diagonalización.



Figura 4. 3 Falla sin desplome de la estructura (Prasad Rao, 2010).



Figura 4. 4 Falla con desplome de la estructura (El Universal, 2014).

El efecto dinámico del viento genera deformaciones y esfuerzos combinados de flexocompresión (Figura 4. 5) en los elementos de la estructura, éstos se transmiten a la cimentación y se origina la falla.

Las fallas generalmente se presentan en los nudos donde concurren los elementos principales que transmiten los esfuerzos a la cimentación. El lugar más frecuente de falla está delimitado en la conexión del montante principal de la estructura con sus diagonales, al nivel del piso natural.

Las fallas en la cimentación se presentan por compresión y flexocompresión de los elementos verticales de la pata de gallo. Otro tipo de falla, que se presenta con frecuencia, es por tensión (Figura 4. 6) debido a la escasa profundidad de empotramiento y compactación deficiente del relleno sobre el cimiento.

Pueden existir fallas en el cuerpo piramidal de la torre de transmisión que no llegan a afectar a la cimentación (Figura 4. 7), así como fallas en la superestructura sin afectar el cuerpo piramidal (Figura 4. 8). Este tipo de daños se deben principalmente a cambios focalizados, como flujo turbulento del viento, cambio de relación de solidez o falta de rigidez.

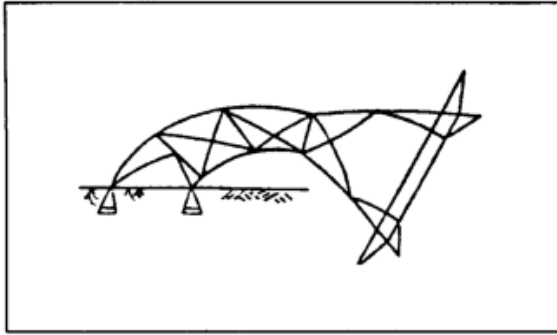


Figura 4. 5 Falla por flexión, flexión-compresión (Bahena, 1996).

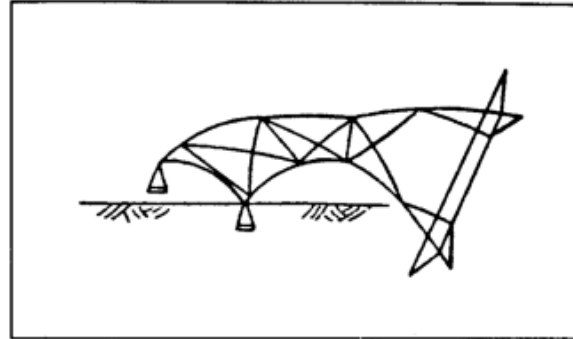


Figura 4. 6 Falla por tensión, tensión-compresión (Bahena, 1996).

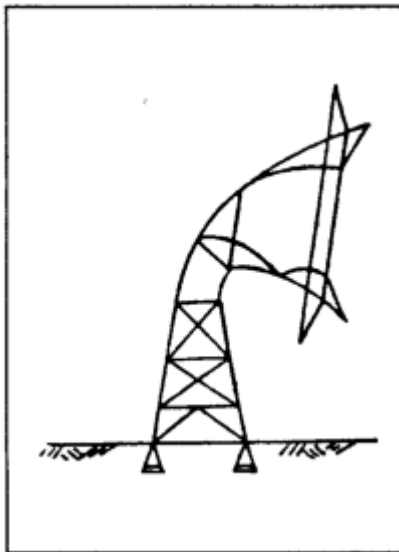


Figura 4. 7 Falla el cuerpo piramidal sin afectar la cimentación (Bahena, 1996).

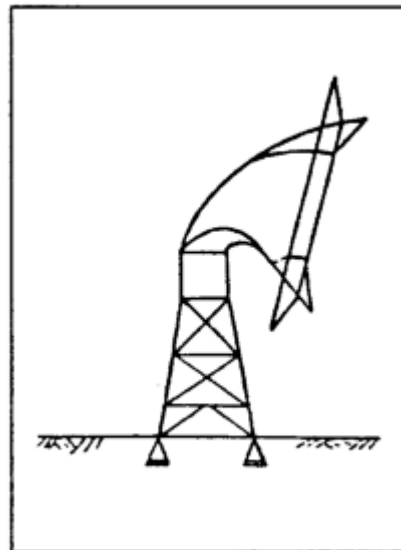


Figura 4. 8 Falla la superestructura sin afectar el cuerpo piramidal (Bahena, 1996).

Así mismo se pueden presentar fallas por capacidad estructural en los elementos que componen la torre de transmisión. Los elementos se pandean ante cargas de viento que superan las velocidades de diseño, como es el caso de huracanes, tormentas severas o tornados (Figura 4. 9 y Figura 4. 10).

Otra forma de falla es al romperse algún cable, ya sea conductor o de guarda, las diagonales debajo de la cruceta donde se soportan dichos elementos se sobreesfuerzan y generan el colapso del panel en el que se localizan (Figura 4. 11).

De igual manera se han presentado casos en los cuales una torre de transmisión colapsa por el jalón ocasionado por el derrumbe de alguna otra torre en la misma línea de transmisión. Si una torre es jalada con una fuerza cercana a la de su capacidad a flexión, es probable que dicha torre colapse.

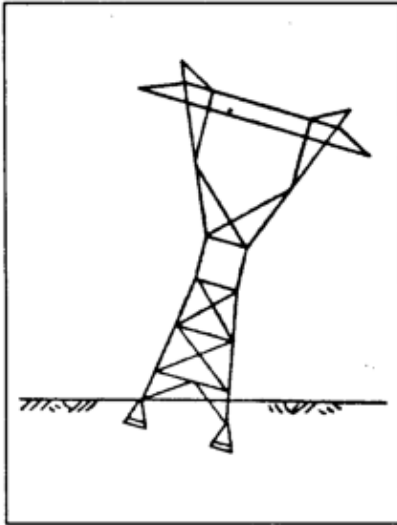


Figura 4. 9 Falla en la pata de gallo por fuerza de grandes proporciones (Bahena, 1996).



Figura 4. 10 Falla en elementos estructurales por fuerzas de grandes proporciones (Runestone Electric Association, 2011).



Figura 4. 11 Falla por ruptura de algún cable (Gaceta electrónica UNAM, 2012).

Se ha demostrado que la correcta estructuración y colocación de elementos redundantes, contribuye a la rigidez de la estructura y a evitar fallas prematuras de las mismas. Muchas torres de transmisión han fallado debido a que poseen una estructuración de diagonales en forma de "K" o "X" (Figura 4. 12), o no poseen un patrón completamente triangular. Esto ocasiona inestabilidad geométrica e insuficiente arriostamiento del elemento principal ocasionando fallas prematuras (Figura 4. 13).

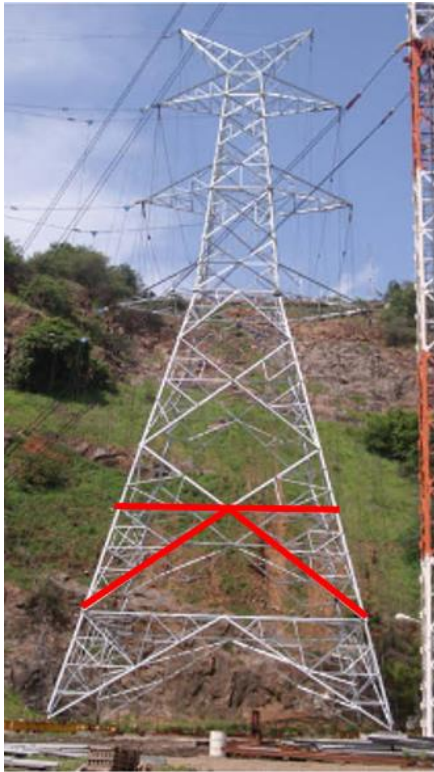


Figura 4. 12 Diagonalización en "K" (Prasad Rao et al., 2010).



Figura 4. 13 Falla por incorrecta diagonalización (Prasad Rao et al., 2010).

4.4 EFECTO DEL VIENTO SOBRE CABLES

Los cables de las líneas de transmisión están expuestos constantemente a corrientes de aire, al ser estructuras flexibles son altamente susceptibles a las fluctuaciones del flujo del viento, generando fenómenos aeroelásticos como el desprendimiento de vórtices y galope, así como vibraciones eólicas y oscilaciones en subclaros.

Los fenómenos aeroelásticos se presentan cuando un cuerpo elástico se encuentra inmerso en una corriente de un fluido, el cuerpo se mueve o se deforma bajo las fuerzas producidas y ese movimiento o deformación cambia las condiciones de contorno para el fluido, modificando a su vez las fuerzas aerodinámicas que el flujo ejerce sobre el obstáculo.

4.4.1 Desprendimiento de vórtices

El desprendimiento de vórtices es caracterizado por el número de Strouhal, S_t , que define la frecuencia principal de los vórtices alternados que se desprenden de un cuerpo romo, definido con la Ec. 4. 8.

$$S_t = \frac{f_s b}{U} \quad \text{Ec. 4. 8}$$

Donde:

S_t = Número de Strouhal, adimensional.

f_s = Frecuencia de desprendimiento, Hz.

b = Dimensión característica transversal, m.

U = Velocidad del viento, m/s.

El desprendimiento de vórtices puede ser peligroso si la frecuencia de desprendimiento coincide con alguna de las frecuencias propias de los cables, apareciendo el efecto de resonancia, causando flexión en la abrazadera y, dependiendo del nivel de esfuerzos, puede causar falla por fatiga en éstos.

A partir de la velocidad crítica, U , se puede determinar el valor del número de Reynolds y con él, obtener la fuerza de excitación aerodinámica y si el efecto de los vórtices alternados es importante.

$$Re = \frac{bU}{\nu} \quad \text{Ec. 4. 9}$$

En donde:

ν = Viscosidad cinemática, que para el aire a 19 °C equivale $\nu = 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

4.4.2 Galope

El galope es una inestabilidad que se presenta en cables, o estructuras esbeltas, cuando tienen secciones transversales no circulares, rectangulares o en forma de D, como las que se forman cuando los cables se cubren de hielo. Se produce con elevadas velocidades de viento (mayores a 15 m/s) al acoplarse entre las fuerzas de sustentación y de resistencia cuando la estructura se encuentra oscilando en una dirección perpendicular a la corriente incidente. Se presenta un esquema de las fuerzas de sustentación y arrastre involucradas en el fenómeno de galope en la Figura 4. 14.

El módulo de velocidad relativa del fluido respecto al cuerpo es (Meseguer *et al.*, 2001):

$$U_r = \sqrt{U^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} \quad \text{Ec. 4. 10}$$

Y el ángulo de ataque de esta velocidad en el instante considerado es $\alpha = (dz/dt)/U$.

En el instante en consideración la resistencia aerodinámica, $d(\alpha)$, y la sustentación, $l(\alpha)$, serán:

$$d(\alpha) = \frac{1}{2} \rho U_r^2 b c_d(\alpha) \quad \text{Ec. 4. 11}$$

$$l(\alpha) = \frac{1}{2} \rho U_r^2 b c_l(\alpha) \quad \text{Ec. 4. 12}$$

En donde:

U_r = Velocidad relativa, m/s.

ρ = Densidad del aire, kg/m³.

c_d = Coeficiente de presión de resistencia, adimensional.

c_l = Coeficiente de presión de sustentación, adimensional.

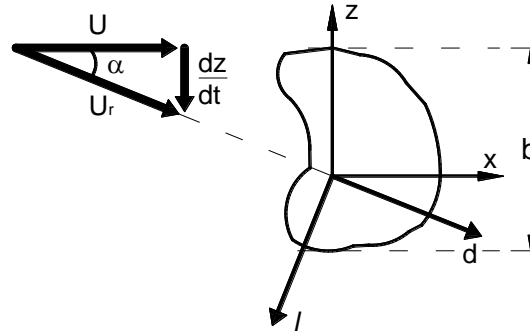


Figura 4. 14 Esquema de velocidades relativas y cargas aerodinámicas que se presentan durante el galope.

La expresión conocida como criterio de Glauert – Den Hartong expresa la condición necesaria para que comience la inestabilidad de galope, considerando que el movimiento de oscilación del cuerpo es estable si el amortiguamiento $\zeta_T > 0$ e inestable si $\zeta_T < 0$.

$$\zeta_T = \zeta + \frac{\rho U b}{2m\omega_n} \left(\frac{dc_l}{d\alpha} + c_d \right)_{\alpha=0} \quad \text{Ec. 4. 13}$$

En donde

ζ_T = Coeficiente total de amortiguamiento del sistema.

ζ = Coeficiente de amortiguamiento mecánico.

m = Masa por unidad de longitud, kg/m.

ω_n = Frecuencia angular de resonancia, $\omega_n = 2\pi f$.

Como la relación de amortiguamiento mecánico, ζ , es generalmente positiva, la inestabilidad sólo ocurrirá si:

$$\left(\frac{dc_l}{d\alpha} + c_d \right)_{\alpha=0} < -\frac{2m\zeta\omega_n}{\rho U b} \quad \text{Ec. 4. 14}$$

4.4.3 Vibraciones eólicas y oscilaciones en subclaros

Las vibraciones eólicas se generan por el desprendimiento de vórtices, éstas inducen movimientos fluctuantes de alta frecuencia y baja amplitud y en la dirección vertical del cable (Figura 4. 15). Este tipo de vibraciones son controladas fácilmente agregando amortiguadores a los cables. Ocurren en velocidades de bajas a moderadas.

Las oscilaciones en los subclaros (Figura 4. 15) suceden con velocidades de viento de medianas a altas (mayores a 10 m/s) y no son tan comunes como los anteriores efectos. Estas oscilaciones se

presentan por los efectos de fuerzas de viento sobre los conductores agrupados en conjuntos de dos, cuatro, seis o más cables situados en paralelo y separados por espaciadores mecánicos. Sólo puede ocurrir cuando las frecuencias propias del cable situado corriente abajo (primer cable en la dirección del viento) son bajas en comparación a las frecuencias de desprendimiento de vórtices tanto suyas como las del cable situado corriente arriba (detrás del primer cable). Debido a ello, la estela de vórtices del primer cable ocasionará el movimiento del segundo cable (Meseguer, 2001).

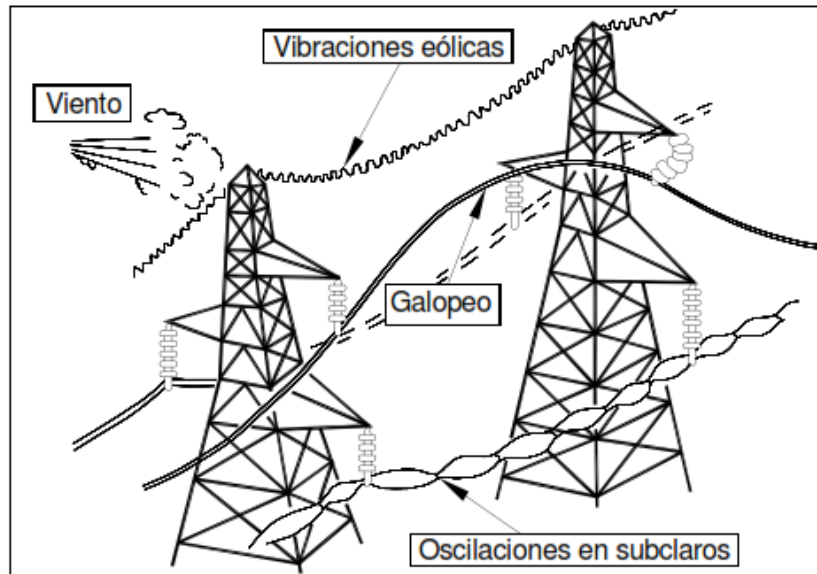


Figura 4. 15 Movimientos inducidos por el viento en los cables (Morales, 2008).

4.5 METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LAS ACCIONES DEL VIENTO

4.5.1 Acciones del viento en torres de transmisión

Para obtener las acciones del viento sobre estructuras de celosía se deben obtener velocidades y presiones de acuerdo al lugar donde se encuentre dicha estructura. El Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento (MDOC-DV) (CFE, 2008), propone el siguiente procedimiento para obtener las cargas por viento. Se calculó la fuerza para un ángulo de ataque del viento de 0°, 90° y 45°.

La fuerza estática de arrastre para el diseño de las torres de celosía aisladas, en la dirección del flujo del viento, se obtiene para cada tramo o sección en que deben dividirse verticalmente las mismas; deben emplearse un mínimo de diez tramos. Así, esta fuerza se calcula con la ecuación:

$$F_{at} = C_{at} A_{At} q_z \quad \text{Ec. 4. 15}$$

En donde

F_{at} = Fuerza de arrastre en el tramo considerado que actúa en la dirección del viento, N.

C_{at} = Coeficiente de arrastre del tramo considerado, adimensional.

A_{At} = Área de los miembros de la cara frontal del tramo, proyectada perpendicularmente a la dirección del viento, en m².

q_z = Presión dinámica de base, que se encuentra en el punto medio de la longitud vertical del tramo, en Pa.

Las torres de celosía autoportadas utilizadas para la transmisión de energía eléctrica, al tener una relación de esbeltez mayor a 5 y periodos largos, son sensibles antes los efectos dinámicos del viento provocados por el viento turbulento.

La respuesta dinámica de una estructura puede obtenerse multiplicando la respuesta o fuerza estática por un factor de amplificación dinámica. En este caso la Ec. 4. 15 queda de la forma:

$$F_{eq} = C_{at} A_{At} q_z F_{AD} \quad \text{Ec. 4. 16}$$

$$F_{eq} = F_{at} F_{AD} \quad \text{Ec. 4. 17}$$

El MDOC-DV (CFE, 2008) propone la siguiente expresión para el Factor de amplificación dinámica F_{AD} para torres de celosía autoportadas:

$$F_{AD} = \frac{1 + 2I_v(z_s) k_p \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7I_v(z_s)} \left(\frac{C_{RG}}{C_G} \right) F_M \quad \text{Ec. 4. 18}$$

En donde

B^2 = Factor de respuesta de fondo, adimensional.

$I_v(z_s)$ = Índice de turbulencia a la altura de referencia, z_s .

R^2 = El factor de respuesta en resonancia, adimensional.

k_p = El factor pico, adimensional.

C_{RG}, C_G = Las constantes correctivas de la forma modal, adimensionales.

F_M = El factor de corrección de la masa, adimensional.

(z_s) = La altura de referencia, para este tipo de estructuras es igual a la altura total de la torre, en m.

4.5.1.1 Parámetros básicos para calcular la fuerza del viento.

Velocidad básica de diseño, V_D

La velocidad de diseño es aquella con la cual se calculan los efectos del viento sobre las estructuras, en el caso de torres de celosía se aplica sobre las estructuras de soporte, cables y aisladores.

La velocidad de diseño se obtiene con la expresión:

$$V_D = F_T F_{rz} V_R \quad \text{Ec. 4. 19}$$

Donde

V_D = Velocidad básica de diseño, km/h.

F_T = Factor de topografía local, adimensional

F_{Tz} = Factor de exposición local, adimensional

V_R = Velocidad regional de ráfaga, km/h

Clasificación de las estructuras según su respuesta ante la acción del viento

El MDOC-DV (CFE, 2008) clasifica a las estructuras civiles, en función a su comportamiento ante los efectos dinámicos del viento, en cuatro tipos (Tabla 4. 1). Dependiendo de la clase en la que se encuentre la estructura a analizar, se sigue el procedimiento adecuado para estimar las cargas de viento sobre la misma.

Tabla 4. 1 Clasificación de las estructuras según su respuesta al viento (CFE, 2008).

CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
Tipo 1	Estructuras poco sensibles a las ráfagas y a los efectos dinámicos del viento. Relación de esbeltez, λ , es menor o igual que cinco. Periodo natural de vibración del primer modo menor o igual a un segundo.
Tipo 2	Estructuras sensibles a la turbulencia del viento. Relación de esbeltez, λ , es mayor que cinco. Periodo natural de vibración del primer modo mayor a un segundo.
Tipo 3	Mismas características que las Tipo 2 y además presentan oscilaciones transversales al flujo del viento al aparecer vórtices.
Tipo 4	Estructuras que presentan problemas aerodinámicos inestables debido a su forma, dimensiones o por la magnitud de sus periodos de vibración.

Categoría del terreno según su rugosidad

Para tomar en cuenta las condiciones de rugosidad y exposición del terreno sobre el cual está desplantada la construcción a analizar, es necesario clasificarlo de manera práctica. Se debe considerar la distancia denominada “longitud mínima de desarrollo” para la dirección del viento que se esté analizando y la dirección dónde se produzcan los efectos más desfavorables.

En la Tabla 4. 2 se describen las categorías del terreno establecidas en el MDOC-DV (CFE, 2008).

Velocidad de regional, V_R

La velocidad regional del viento V_R es la máxima velocidad media probable que puede presentarse con un cierto periodo de recurrencia en una zona o región determinada del país (CFE, 2011 b).

La velocidad regional de ráfaga para diseño puede determinarse para un periodo de retorno fijo o como una velocidad regional óptima. La primera es la velocidad máxima que puede ser excedida en cierto periodo de retorno T, en años, en una zona determinada. La segunda corresponde a la máxima velocidad para la cual se minimiza el costo total con el costo inicial de la construcción más el costo de las reparaciones relacionándolo con el parámetro adimensional Q, llamado factor de importancia de las pérdidas.

En el MDOC-DV (CFE, 2008) estas velocidades aparecen en mapas de isotacas, y están determinadas bajo condiciones homogéneas preestablecidas: categoría de terreno dos, velocidades asociadas con ráfagas de tres segundos y evaluadas a diez metros de altura en terreno plano, expresadas en km/h.

Según la clasificación de las estructuras propuesta por el MDOC-DV (CFE, 2008), las estructuras debido a su importancia, pueden pertenecer al grupo A, B o C; y con base en ello se selecciona una velocidad regional adecuada.

La Tabla 4. 3 describe la velocidad regional correspondiente al tipo de estructura según su importancia.

Tabla 4. 2 Categoría del terreno según su rugosidad (CFE, 2008)

CAT.	DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS	LIMITACIONES
1	Terreno abierto, prácticamente plano, sin obstrucciones y superficie de agua	Franja costera, pantanos, campos aéreos, pastizales y tierras de cultivo sin bardas.	Longitud mínima de 2000 m o 10 veces la altura de la construcción a diseñar, la que sea mayor.
2	Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones	Campos de cultivo con pocas obstrucciones.	Longitud mínima mayor entre 1500 m y 10 veces la altura de la construcción. Las obstrucciones tienen alturas de 1.5 a 10 m.
3	Terreno cubierto por numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas	Áreas urbanas, suburbanas y bosques.	Longitud mínima mayor entre 500 m y 10 veces la altura de la construcción. Las obstrucciones tienen alturas de 3 a 5 m.
4	Terreno con numerosas obstrucciones largas, altas y estrechamente espaciadas	Centros de grandes ciudades y complejos industriales desarrollados.	Longitud mínima mayor entre 400 m y 10 veces la altura de la construcción. Las obstrucciones miden de 10 a 30 m de altura. Por lo menos el 50% de los edificios tiene una altura mayor a 20 m.

Tabla 4. 3 Velocidad regional con base en el tipo de estructuras según su importancia.

CLASIFICACIÓN	VELOCIDAD REGIONAL	
	Periodo de retorno fijo	Óptima
A	200 años	Q= 15
B	50 años	Q = 5
C	10 años	--

Sin embargo, la especificación CFE J1000 – 50 (CFE, 2011 b) para torres para transmisión eléctrica señala que la velocidad regional utilizada en las combinaciones de carga de diseño corresponde a un periodo de retorno de 10 y 50 años.

Factor de exposición local, F_{rz}

Para los cálculos efectuados se estableció un terreno tipo dos (CFE, 2011 b). Sin embargo, el factor de exposición local F_{rz} establece la variación de la velocidad del viento con la altura, en función de la categoría del terreno (Ec. 4. 20).

$$\begin{aligned}
 F_{rz} &= c && \text{si } z \leq 10 \\
 F_{rz} &= c \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha && \text{si } 10 < z < \delta \\
 F_{rz} &= c \left(\frac{\delta}{10}\right)^\alpha && \text{si } z \geq \delta
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 4. 20}$$

En donde

z = Es la altura por encima del terreno natural, en m.

α = Es el exponente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura, adimensional.

δ = Altura gradiente, en m.

c = El coeficiente de escala de rugosidad, adimensional.

Las variables α , δ y c están en función de la rugosidad del terreno, los valores recomendados se presentan en la Tabla 4. 4.

Tabla 4. 4 Variables α , δ y c (CFE, 2008).

CATEGORÍA DEL TERRENO	α	δ	c
1	0.099	245	1.137
2	0.128	315	1.000
3	0.156	390	0.881
4	0.170	455	0.815

Factor de topografía local, F_T

Con este factor se incluye el efecto topográfico local del lugar en donde se encuentra la estructura en el cálculo de la velocidad de diseño, pues se pueden presentar aceleraciones del flujo del viento dependiendo la configuración topográfica, como sucede en las cimas de colinas o montañas.

Los valores designados para un lugar en función a la topografía se representan en la Tabla 4. 5.

Tabla 4. 5 Valores del factor de topografía local (CFE, 2008).

SITIO	EJEMPLOS DE TOPOGRAFÍA LOCAL	F_T
Protegidos	Valles cerrados	0.9
Normales	Terreno prácticamente plano: campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, pendientes menores de 5%	1.0
	Terrenos inclinados con pendiente entre 5 y 10%, valles abiertos y litorales planos	1.1
Expuestos	Cimas de promontorios, colinas y montañas, terrenos con pendientes mayores del 10%, cañadas cerradas, valles que formen un embudo o cañón e islas	1.2

En el MDOC-DV (CFE, 2008) se proponen ecuaciones específicas para sitios expuestos en las cuales involucran características topográficas del terreno, como altura de terraplén, distancia horizontal en barlovento o sotavento, entre otras. En la práctica se ha adoptado un valor para el factor de

topografía local en sitios expuestos entre 1.1 y 1.2, debido a la complejidad de los parámetros involucrados en las ecuaciones propuestas.

Presión dinámica de base, q_z

El flujo del viento sobre una construcción genera presiones sobre su superficie, las cuales varía en función de la velocidad y la dirección del viento. La presión ejercida sobre una superficie plana perpendicular al flujo del viento, es denominada como presión dinámica de base, y según el MDOC-DV (CFE, 2008) se obtiene con la Ec. 4. 21.

$$q_z = 0.047GV_D^2 \tag{Ec. 4. 21}$$

En donde

q_z = Presión dinámica de base a una altura z , Pa.

G = Factor de corrección por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar, adimensional

V_D = Velocidad básica de diseño, km/h

El factor G se obtiene con la expresión:

$$G = \frac{0.392 \Omega}{273 + \tau} \tag{Ec. 4. 22}$$

En donde

Ω = Presión barométrica, en mm de Hg

τ = Temperatura ambiental, en °C

La Tabla 4. 6 señala la relación entre la altitud en metros sobre el nivel del mar (msnm) y la presión barométrica en mm de Hg. Los valores que no se encuentran en la tabla se pueden obtener mediante interpolación.

Tabla 4. 6 Valores de la presión barométrica en función de la altura (CFE, 2008).

Altitud h_m (msnm)	Presión barométrica, Ω (mm de Hg)
0	760
500	720
1000	675
1500	635
2000	600
2500	565
3000	530
3500	495

Se tomó el valor de 1 para el factor de corrección G debido a que las curvas de vulnerabilidad no se relacionan a la ubicación del bien expuesto, sino más bien a las características del mismo. Sin embargo, debido a la naturaleza de las acciones sobre la estructura, las cuales varían con la altura y temperatura; se buscó obtener el escenario más desfavorable.

4.5.1.2 *Coefficiente de arrastre para torres de celosía*

El coeficiente de arrastre es una cantidad adimensional que se utiliza para cuantificar el arrastre o resistencia de un objeto en un entorno de fluido. Para las torres de celosía autosoportadas utilizadas para la transmisión de energía eléctrica, el MDOC-DV (CFE, 2008) expresa que para dichas torres deben emplearse otras normas, ya que los valores definidos son para torres aisladas, cuyo comportamiento difiere del de las primeras debido a la ausencia de cables.

Sin embargo se pueden emplear los valores de coeficientes de arrastre propuestos en la norma CFEJ1000-50 (CFE, 2011 b) descritos en la Tabla 4. 7, para torres de celosía con elementos planos. Dichos coeficientes están expresados en función del factor de solidez.

Tabla 4. 7 *Coefficiente de arrastre para torres de celosía con elementos planos (CFE, 2011 b).*

RELACIÓN	C _{at} EN SECCIÓN	
	CUADRADA	TRIANGULAR
$\phi < 0.025$	4.00	3.60
$0.025 \leq \phi \leq 0.44$	4.10 - 5.20 ϕ	3.70 - 4.50 ϕ
$0.45 \leq \phi \leq 0.69$	1.80	1.70
$0.70 \leq \phi \leq 1.00$	1.30 + 0.70 ϕ	1.00 + ϕ

De igual manera se podría emplear alguna norma internacional que exprese valores para los coeficientes de arrastre para torres de celosía. La Norma Británica referente a Líneas de Transmisión contiene tablas para dichos coeficientes en función del factor de solidez, sin embargo, no se emplean en este estudio debido a que se busca relacionar parámetros de diseño utilizados comúnmente en territorio nacional.

4.5.1.3 *Factor de amplificación de ráfaga, F_{AD}*

El factor de amplificación dinámica permite convertir la fuerza estática en una fuerza dinámica equivalente que considera los efectos del flujo turbulento del viento sobre la estructura. Los parámetros anteriormente mencionados se obtienen con las formulaciones siguientes:

Factor de fondo, **B²**

$$B^2 = \frac{1}{1 + 2 \frac{\sqrt{hb}}{L(z_s)}} \tag{Ec. 4. 23}$$

En donde

b = Es el ancho promedio, en m.

h = La altura de la estructura, en m.

L(z_s) = La escala de turbulencia a la altura de referencia *z_s*

$$\begin{aligned} L(z_s) &= 300 \left(\frac{z_s}{200} \right)^{\bar{\alpha}} && \text{para } z_s \geq z_{min} \\ L(z_s) &= L(z_{min}) && \text{para } z_s < z_{min} \end{aligned} \tag{Ec. 4. 24}$$

Índice de turbulencia, $I_v(z_s)$

$$I_v(z_s) = \bar{d} \left(\frac{z_s}{10} \right)^{-\alpha'} \quad \text{para } z_{min} \leq z_s \leq z_{max}$$

$$I_v(z_s) = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right)} \quad \text{para } z_s \leq z_{min}$$

Ec. 4. 25

Donde $z_{max} = 200$ m

Factor de resonancia, R^2

$$R^2 = \frac{\pi}{4\zeta_{est,x}} S_L(z_s, \eta_{1,x}) R_h(\eta_h) R_b(\eta_b)$$

Ec. 4. 26

Para lo cual:

$$S_L(z_s, \eta_{1,x}) = \frac{4 \left(\frac{\eta_{1,x} L(z_s)}{V'_D(z_s)} \right)}{\left(1 + 71 \left(\frac{\eta_{1,x} L(z_s)}{V'_D(z_s)} \right)^2 \right)^{5/6}}$$

Ec. 4. 27

$$R_h(\eta_h) = \frac{1}{1 + \eta_h}$$

Ec. 4. 28

$$R_b(\eta_b) = \frac{1}{1 + \eta_b}$$

Ec. 4. 29

$$V'_D = \frac{F_T F'_{rz} V_R}{3.6}$$

Ec. 4. 30

$$F'_{rz} = 0.702 \bar{b} \quad \text{si } z \leq 10$$

$$F'_{rz} = 0.702 \bar{b} \left(\frac{z}{10} \right)^{\alpha'} \quad \text{si } 10 < z \leq 200$$

Ec. 4. 31

$$\eta_h = \frac{2\eta_{1,x} h}{V'_D(z_s)}$$

Ec. 4. 32

$$\eta_b = \frac{3.5\eta_{1,x} h}{V'_D(z_s)}$$

Ec. 4. 33

En donde

$\zeta_{est,x}$ = Amortiguamiento estructural, según la tabla 4.4.3 del MDOC-DV (CFE, 2008), para torres de celosía atornilladas es de 0.005.

$S_L(z_s, \eta_{1,x})$ = Densidad de potencia del viento

$R_h(\eta_h)$ y $R_b(\eta_b)$ = Funciones de admitancia aerodinámica

$\eta_{1,x}$ = Frecuencia natural en el modo fundamental de vibrar de la estructura en dirección longitudinal del viento, en Hz

V'_D = Velocidad media de diseño del viento, en m/s

Los valores de las constantes \bar{d} , \bar{b} , z_0 , z_{min} , $\bar{\alpha}$ y α' se expresan en la Tabla 4. 8.

Tabla 4. 8 Valores de las constantes \bar{d} , \bar{b} , z_0 , z_{min} , $\bar{\alpha}$ y α' .

CATEGORÍA DEL TERRENO	\bar{d}	\bar{b}	z_0	z_{min}	$\bar{\alpha}$	α'
1	0.15	1.17	0.01	1	0.44	0.12
2	0.19	1.00	0.05	2	0.52	0.16
3	0.29	0.77	0.30	5	0.61	0.21
4	0.43	0.55	1.0	10	0.67	0.29

Factor pico, k_p

$$k_p = \sqrt{2 \ln(600v)} + \frac{0.60}{\sqrt{2 \ln(600v)}} \geq 3.0 \quad \text{Ec. 4. 34}$$

$$v = \eta_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \geq 0.08 \text{ Hz} \quad \text{Ec. 4. 35}$$

En donde:

v = Tasa media de oscilaciones, en Hz.

Constantes correctivas de la forma modal, C_{RG} , C_G

$$C_{RG} = \left[\frac{1 - \frac{3}{4} \lambda_B}{\alpha' + 3} \right] \quad \text{Ec. 4. 36}$$

$$C_G = \left[\frac{1}{2\alpha' + 3} - \frac{\lambda_B}{2\alpha' + 4} \right] \quad \text{Ec. 4. 37}$$

$$\lambda_B = 1 - \frac{b_h}{b_0} \quad \text{Ec. 4. 38}$$

En donde

b_h = Ancho de la estructura de celosía en la altura h, en m.

b_0 = Ancho proyectado de la base de la estructura a nivel de terreno, en m

α' = Exponente de la variación de la velocidad con la altura

Factor de corrección por masa, F_M

$$F_M = \frac{m_{total}}{5m_r} \left[\left(0.5 \frac{b_h}{b_0} - 0.3 \right) (\lambda_m - 2) + 1.4 \right] (1 - 0.4 \ln \lambda_m) \quad \text{Ec. 4. 39}$$

$$m_r = \int_0^h m(z) [\Phi_{1,x}(z)]^2 dz \quad \text{Ec. 4. 40}$$

En donde

m_{total} = Masa total de la estructura, en kg.

m_r = Masa generalizada de la estructura en dirección longitudinal del viento, en kg.

λ_m = Coeficiente que determina la variación de la forma modal con la altura. El valor estimado para torres rectangulares o cuadradas es $\lambda_m = 2$

$m(z)$ = Masa por unidad de longitud de la torre, en kg/m.

$\Phi_{1,x}(z)$ = Configuración modal del primer modo, en la dirección longitudinal del viento, adimensional.

4.5.2 Cálculo de las acciones del viento sobre la torre para transmisión eléctrica

Con base en lo establecido en el MDOC-DV (CFE, 2008) y los siguientes parámetros, se obtuvieron las fuerzas del viento sobre la estructura:

- La velocidad regional de diseño, expresada en los mapas de amenaza y con la cual se calcularán las fuerzas del viento, se tomó como velocidad de ráfaga para mantener la relación con los mapas de velocidades de viento.
- Categoría del terreno 2, por ser el parámetro tomado para la medición de las velocidades del viento.
- Factor de topografía local $F_T=1$. Debido a que este factor se considera en el cálculo de los mapas de viento correspondientes a la amenaza.
- Factor de corrección por temperatura $G=1$, puesto que las velocidades críticas se presentan en lugares donde este factor tiende a ser 1 y los mapas de amenaza están modificados con un factor de reducción.
- Se obtuvo la fuerza del viento ocasionada por velocidades de 50, 75, 100, 125, 130, 135, 140, 145, 150, 155, 160, 165, 170 y 200 km/h.
- Se consideran tres ángulos de ataque del viento sobre la estructura: 0°, 45° y 90° (Figura 4.16).

Los resultados de las tablas que a continuación se muestran, fueron obtenidos para una velocidad de 50 km/h. La Tabla 4. 9 representa la presión dinámica de base correspondiente a la velocidad regional antes mencionada. En la Tabla 4. 10 se muestra el Factor de Amplificación obtenido para la velocidad en una dirección del viento de 0°. En la Tabla 4. 11, Tabla 4. 12 y Tabla 4. 13 se resumen los parámetros necesarios para obtener la Fuerza Dinámica Equivalente para el viento actuando en dirección de 0°, 90° y 45° respectivamente.

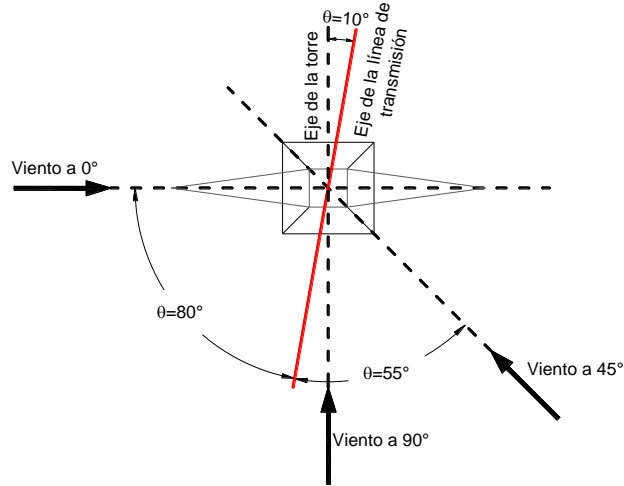


Figura 4. 16 Ángulo de ataque del viento respecto al eje de la línea.

Para el cálculo de la fuerza producida por el viento actuante a 45° se procedió de la siguiente manera:

- Se obtuvo la presión dinámica de base con los datos generales.
- Se obtuvo la fuerza estática y se proyectó en el eje x y y.
- Se calcularon los parámetros dinámicos para la dirección x y para la dirección y, con las correspondientes frecuencias.
- Se obtuvo la Fuerza dinámica equivalente para x y para y.

Para el cálculo de la fuerza dinámica equivalente se tienen los datos:

ζ_{est}	0.005	
n_x	1.25	Hz
n_y	1.28	Hz
h	52.53	m
b_h	1.5	m
b_0	5.92	m
m_{total}	58655.79	kgf
λ_B	0.75	

C_{RG}	0.14	
C_G	0.13	
m_{rx}	2678.41	kgf
m_{ry}	2790.24	kgf
λ_m	2.00	
F_{Mx}	4.43	
F_{My}	4.25	

La fuerza del viento obtenida en cada panel se dividió entre el número de puntos de intersección correspondiente, en la Figura 4. 17 se representa el lugar donde se colocó tanto la fuerza del viento y las fuerzas del peso de los cables, cadena de aisladores y herrajes.

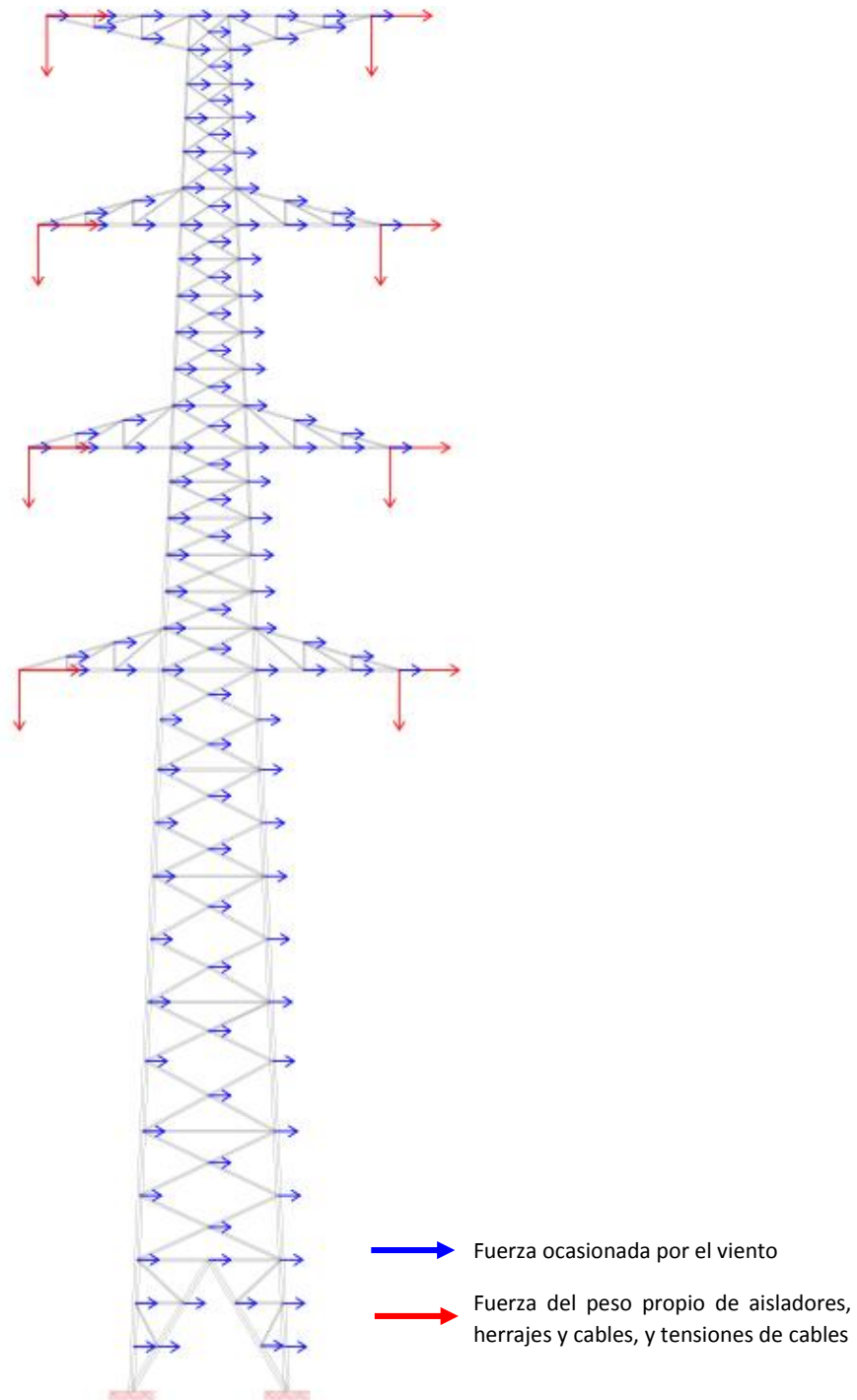


Figura 4. 17 Posición de las fuerzas del viento en la torre de transmisión.

Tabla 4. 9 Presión dinámica de base producida por la acción del viento.

	ALTURA PANEL (m)	F_{rz}	V_D (km/h)	$q_z=0.0048GV_D$ (kg/m ²)
Panel 1	2.5	1.000	50.00	12.00
Panel 2	6.23	1.000	50.00	12.00
Panel 3	8.68	1.000	50.00	12.00
Panel 4	11.25	1.015	50.76	12.37
Panel 5	13.72	1.041	52.07	13.01
Panel 6	16.05	1.062	53.12	13.55
Panel 7	18.45	1.082	54.08	14.04
Panel 8	20.67	1.097	54.87	14.45
Panel 9	22.71	1.111	55.53	14.80
Panel 10	24.68	1.123	56.13	15.12
Panel 11	26.58	1.133	56.66	15.41
Panel 12	28.33	1.143	57.13	15.67
Panel 13	29.83	1.150	57.51	15.87
Panel 14	31.23	1.157	57.85	16.06
Panel 15	32.63	1.163	58.17	16.24
Panel 16	34.03	1.170	58.49	16.42
Panel 17	35.38	1.176	58.78	16.58
Panel 18	36.83	1.182	59.08	16.75
Panel 19	38.33	1.188	59.38	16.93
Panel 20	39.73	1.193	59.66	17.08
Panel 21	41.13	1.198	59.92	17.23
Panel 22	42.53	1.204	60.18	17.38
Panel 23	43.88	1.208	60.42	17.52
Panel 24	45.23	1.213	60.65	17.66
Panel 25	46.63	1.218	60.89	17.80
Panel 26	47.98	1.222	61.11	17.93
Panel 27	49.28	1.226	61.32	18.05
Panel 28	50.58	1.231	61.53	18.17
Panel 29	51.88	1.235	61.73	18.29

Tabla 4. 10 Factor de amplificación dinámica equivalente producida por el viento a 0°.

	ALTURA PANEL (m)	$L_{(zs)}$	B^2	$l_{v(zs)}$	V'_D (km/h)	R^2	v	k_p	F_{AD}
Panel 1	2.5	30.73	0.5239	0.2372	9.75	0.020	0.241	3.34	3.92
Panel 2	6.23	49.39	0.6388	0.2050	9.75	0.015	0.188	3.27	4.11
Panel 3	8.68	58.71	0.6777	0.1943	9.75	0.013	0.173	3.24	4.17
Panel 4	11.25	67.17	0.7064	0.1865	9.94	0.013	0.166	3.23	4.22
Panel 5	13.72	74.47	0.7273	0.1806	10.26	0.013	0.164	3.23	4.25
Panel 6	16.05	80.80	0.7432	0.1761	10.52	0.013	0.163	3.23	4.28
Panel 7	18.45	86.88	0.7568	0.1723	10.75	0.013	0.163	3.23	4.30
Panel 8	20.67	92.16	0.7675	0.1692	10.95	0.013	0.162	3.22	4.32
Panel 9	22.71	96.79	0.7761	0.1666	11.12	0.013	0.162	3.22	4.34
Panel 10	24.68	101.07	0.7835	0.1644	11.27	0.013	0.161	3.22	4.35
Panel 11	26.58	105.04	0.7900	0.1625	11.40	0.013	0.161	3.22	4.36
Panel 12	28.33	108.58	0.7955	0.1608	11.52	0.013	0.161	3.22	4.37
Panel 13	29.83	111.53	0.7998	0.1595	11.61	0.013	0.161	3.22	4.38
Panel 14	31.23	114.23	0.8036	0.1584	11.70	0.013	0.160	3.22	4.38
Panel 15	32.63	116.86	0.8072	0.1572	11.78	0.013	0.160	3.22	4.39
Panel 16	34.03	119.44	0.8105	0.1562	11.86	0.013	0.160	3.22	4.39
Panel 17	35.38	121.88	0.8136	0.1552	11.93	0.014	0.160	3.22	4.40
Panel 18	36.83	124.45	0.8168	0.1542	12.01	0.014	0.160	3.22	4.40
Panel 19	38.33	127.06	0.8199	0.1532	12.09	0.014	0.160	3.22	4.41
Panel 20	39.73	129.46	0.8226	0.1524	12.16	0.014	0.160	3.22	4.41
Panel 21	41.13	131.81	0.8252	0.1515	12.23	0.014	0.160	3.22	4.42
Panel 22	42.53	134.12	0.8277	0.1507	12.29	0.014	0.159	3.22	4.42
Panel 23	43.88	136.32	0.8300	0.1500	12.35	0.014	0.159	3.22	4.42
Panel 24	45.23	138.49	0.8322	0.1492	12.41	0.014	0.159	3.22	4.43
Panel 25	46.63	140.70	0.8344	0.1485	12.47	0.014	0.159	3.22	4.43
Panel 26	47.98	142.80	0.8365	0.1478	12.53	0.014	0.159	3.22	4.44
Panel 27	49.28	144.80	0.8384	0.1472	12.58	0.014	0.159	3.22	4.44
Panel 28	50.58	146.78	0.8402	0.1466	12.64	0.014	0.159	3.22	4.44
Panel 29	51.88	148.73	0.8419	0.1460	12.69	0.014	0.159	3.22	4.44

Tabla 4. 11 Fuerza dinámica equivalente producida por la acción del viento a 0°.

	ALTURA PANEL (m)	ÁREA EXPUESTA (m ²)	FACTOR DE SOLIDEZ	C _{cat}	q _z (kg/m ²)	F _{AD}	F _{eq} (kg)
Panel 1	2.5	6.026	0.21	3.00	12.00	3.92	851.54
Panel 2	6.23	3.062	0.23	2.90	12.00	4.11	438.10
Panel 3	8.68	2.714	0.21	2.99	12.00	4.17	406.42
Panel 4	11.25	2.674	0.20	3.06	12.37	4.22	426.07
Panel 5	13.72	2.332	0.22	2.97	13.01	4.25	383.65
Panel 6	16.05	2.261	0.21	3.03	13.55	4.28	396.80
Panel 7	18.45	2.204	0.21	3.01	14.04	4.30	400.33
Panel 8	20.67	1.991	0.23	2.89	14.45	4.32	358.91
Panel 9	22.71	1.943	0.24	2.86	14.80	4.34	357.36
Panel 10	24.68	1.843	0.25	2.79	15.12	4.35	337.80
Panel 11	26.58	1.798	0.26	2.76	15.41	4.36	333.84
Panel 12	28.33	3.211	0.22	2.94	15.67	4.37	645.85
Panel 13	29.83	1.620	0.34	2.34	15.87	4.38	262.84
Panel 14	31.23	1.631	0.35	2.26	16.06	4.38	259.45
Panel 15	32.63	1.420	0.32	2.44	16.24	4.39	246.83
Panel 16	34.03	1.070	0.25	2.80	16.42	4.39	216.12
Panel 17	35.38	1.016	0.27	2.72	16.58	4.40	201.47
Panel 18	36.83	2.371	0.18	3.17	16.75	4.40	554.24
Panel 19	38.33	0.953	0.25	2.79	16.93	4.41	198.12
Panel 20	39.73	0.928	0.26	2.76	17.08	4.41	193.28
Panel 21	41.13	1.018	0.30	2.56	17.23	4.42	198.58
Panel 22	42.53	0.879	0.27	2.71	17.38	4.42	182.78
Panel 23	43.88	0.855	0.30	2.57	17.52	4.42	170.04
Panel 24	45.23	1.925	0.18	3.15	17.66	4.43	474.92
Panel 25	46.63	0.820	0.29	2.57	17.80	4.43	166.50
Panel 26	47.98	0.585	0.24	2.86	17.93	4.44	132.85
Panel 27	49.28	0.568	0.25	2.82	18.05	4.44	128.24
Panel 28	50.58	0.518	0.24	2.86	18.17	4.44	119.33
Panel 29	51.88	1.388	0.15	3.31	18.29	4.44	373.23

Tabla 4. 12 Fuerza dinámica equivalente producida por el viento a 90°.

	ALTURA PANEL (m)	ÁREA EXPUESTA (m ²)	FACTOR DE SOLIDEZ	C _{at}	q _z (kg/m ²)	F _{AD}	F _{eq} (kg)
Panel 1	2.5	6.026	0.20	3.00	12.00	3.76	816.62
Panel 2	6.23	3.062	0.19	2.90	12.00	3.95	420.24
Panel 3	8.68	2.714	0.19	2.99	12.00	4.00	389.88
Panel 4	11.25	2.391	0.18	3.17	12.37	4.04	378.78
Panel 5	13.72	2.332	0.22	2.97	13.01	4.08	368.05
Panel 6	16.05	2.261	0.21	3.03	13.55	4.11	380.67
Panel 7	18.45	2.204	0.21	3.01	14.04	4.13	384.06
Panel 8	20.67	1.991	0.23	2.89	14.45	4.15	344.32
Panel 9	22.71	1.943	0.24	2.86	14.80	4.16	342.83
Panel 10	24.68	1.843	0.25	2.79	15.12	4.17	324.08
Panel 11	26.58	1.798	0.26	2.76	15.41	4.18	320.28
Panel 12	28.33	4.532	0.44	2.46	15.67	4.19	732.33
Panel 13	29.83	1.620	0.34	2.34	15.87	4.20	252.16
Panel 14	31.23	1.631	0.35	2.26	16.06	4.20	248.91
Panel 15	32.63	1.420	0.30	2.44	16.24	4.21	236.80
Panel 16	34.03	1.070	0.25	2.80	16.42	4.21	207.34
Panel 17	35.38	1.016	0.27	2.72	16.58	4.22	193.29
Panel 18	36.83	3.844	0.29	2.59	16.75	4.22	704.56
Panel 19	38.33	0.953	0.25	2.79	16.93	4.23	190.08
Panel 20	39.73	0.928	0.26	2.76	17.08	4.23	185.43
Panel 21	41.13	1.018	0.30	2.56	17.23	4.24	190.52
Panel 22	42.53	0.879	0.27	2.71	17.38	4.24	175.36
Panel 23	43.88	0.855	0.30	2.57	17.52	4.25	163.13
Panel 24	45.23	3.573	0.33	2.35	17.66	4.25	628.78
Panel 25	46.63	0.820	0.25	2.57	17.80	4.25	159.74
Panel 26	47.98	0.585	0.22	2.86	17.93	4.26	127.46
Panel 27	49.28	0.568	0.22	2.82	18.05	4.26	123.03
Panel 28	50.58	0.518	0.24	2.86	18.17	4.26	114.48
Panel 29	51.88	2.788	0.31	2.51	18.29	4.26	545.26

Tabla 4. 13 Fuerzas producidas por el viento a 45° en los ejes x y y.

	ALTURA PANEL (m)	ÁREA EXPUESTA	FACTOR DE SOLIDEZ	C _{at}	q _z (kg/m ²)	F _{at}	F _{at} x-y	Dirección x		Dirección y	
								F _{AD}	F _{Eq}	F _{AD}	F _{Eq}
Panel 1	2.5	9.992	0.27	2.28	12.00	273.41	193.33	3.92	758.23	3.76	727.15
Panel 2	6.23	4.604	0.28	2.29	12.00	126.68	89.58	4.11	368.51	3.95	353.48
Panel 3	8.68	4.105	0.29	2.42	12.00	119.44	84.46	4.17	352.24	4.00	337.90
Panel 4	11.25	4.056	0.27	2.52	12.37	126.25	89.27	4.22	376.36	4.04	361.05
Panel 5	13.72	3.551	0.33	2.38	13.01	110.13	77.88	4.25	331.20	4.08	317.73
Panel 6	16.05	3.444	0.31	2.47	13.55	115.01	81.32	4.28	348.10	4.11	333.95
Panel 7	18.45	3.360	0.32	2.43	14.04	114.73	81.13	4.30	349.16	4.13	334.97
Panel 8	20.67	2.997	0.35	2.27	14.45	98.45	69.61	4.32	300.86	4.15	288.63
Panel 9	22.71	2.952	0.36	2.22	14.80	97.16	68.70	4.34	297.93	4.16	285.82
Panel 10	24.68	2.789	0.38	2.11	15.12	89.10	63.00	4.35	274.00	4.17	262.86
Panel 11	26.58	2.859	0.41	1.97	15.41	86.99	61.51	4.36	268.17	4.18	257.27
Panel 12	28.33	4.341	0.30	2.53	15.67	172.06	121.66	4.37	531.51	4.19	509.92
Panel 13	29.83	2.416	0.51	1.80	15.87	69.03	48.81	4.38	213.58	4.20	204.91
Panel 14	31.23	2.431	0.53	1.80	16.06	70.29	49.70	4.38	217.78	4.20	208.94
Panel 15	32.63	2.118	0.44	1.80	16.24	61.91	43.78	4.39	192.09	4.21	184.29
Panel 16	34.03	1.598	0.37	2.16	16.42	56.63	40.04	4.39	175.93	4.21	168.78
Panel 17	35.38	1.658	0.43	1.85	16.58	50.78	35.91	4.40	157.93	4.22	151.52
Panel 18	36.83	3.301	0.25	2.80	16.75	155.03	109.62	4.40	482.72	4.22	463.12
Panel 19	38.33	1.439	0.38	2.12	16.93	51.56	36.46	4.41	160.73	4.23	154.20
Panel 20	39.73	1.406	0.39	2.07	17.08	49.81	35.22	4.41	155.42	4.23	149.11
Panel 21	41.13	1.373	0.40	2.03	17.23	47.95	33.91	4.42	149.78	4.24	143.70
Panel 22	42.53	1.341	0.41	1.97	17.38	45.99	32.52	4.42	143.78	4.24	137.94
Panel 23	43.88	1.455	0.50	1.80	17.52	45.91	32.46	4.42	143.63	4.25	137.80
Panel 24	45.23	3.439	0.24	2.41	17.66	146.45	103.55	4.43	458.58	4.25	439.97
Panel 25	46.63	1.107	0.32	2.04	17.80	40.20	28.43	4.43	125.99	4.25	120.88
Panel 26	47.98	0.906	0.33	2.18	17.93	35.33	24.98	4.44	110.81	4.26	106.31
Panel 27	49.28	0.884	0.34	2.11	18.05	33.61	23.77	4.44	105.48	4.26	101.20
Panel 28	50.58	0.803	0.37	2.17	18.17	31.66	22.39	4.44	99.43	4.26	95.39
Panel 29	51.88	2.319	0.25	2.78	18.29	117.72	83.24	4.44	369.94	4.26	354.92

4.5.3 Acciones del viento en cables

En la normativa mexicana (MDOC-DV) se expresa de manera específica que los efectos del viento en este tipo de estructuras se evaluarán mediante estudios analíticos y/o experimentales, pues no se cuentan con expresiones que permitan obtener dichas fuerzas.

Para obtener las acciones del viento en los cables de una línea de transmisión eléctrica se utilizó el método propuesto por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (Holmes, 2001). Siendo la fuerza nominal que actúa en un cable individual, perpendicular al flujo del viento:

$$F_c = q_z C_D A_c \text{sen}^2 \theta \alpha \quad \text{Ec. 4. 41}$$

La fuerza uniformemente distribuida, será entonces:

$$w_c = q_z C_D b \text{sen}^2 \theta \alpha \quad \text{Ec. 4. 42}$$

En donde:

a) Presión dinámica de base, q_z

Para el cálculo de la presión dinámica de base, la velocidad, en m/s, se toma a una distancia promedio, representada en la Figura 4. 18.

$$z_r = \frac{0.5(z_1 + z_2) + z_{min}}{2} \quad \text{Ec. 4. 43}$$

Donde

z_1 = Distancia máxima al terreno, m.

z_2 = Distancia máxima al terreno, m.

z_{min} = Distancia mínima al terreno, m.

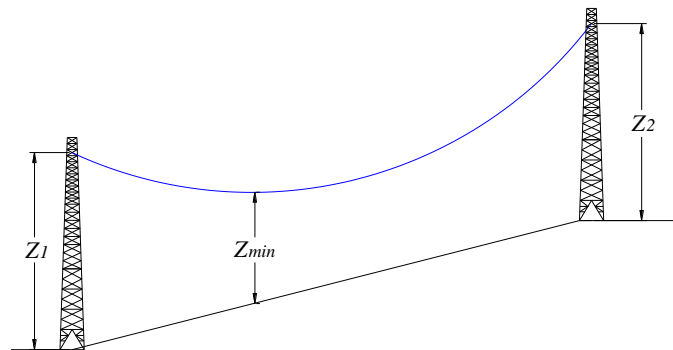


Figura 4. 18 Cálculo de la altura promedio de los cables.

Por lo tanto, la presión dinámica de base, se calcula como:

$$q_z = 0.0048 V_{Dr}^2 \quad \text{Ec. 4. 44}$$

Donde

V_{Dr} = es la velocidad del viento a la altura promedio de los cables, en m/s.

b) Coeficiente de arrastre, C_D

El coeficiente de arrastre para cables, se encuentra en función del número de Reynolds, R_e :

$$R_e = \frac{V_{Dr} b}{15 \times 10^{-6}} \quad \text{Ec. 4. 45}$$

Donde

b = es el diámetro del conductor, en m.

La Figura 4. 19 relaciona el Coeficiente de arrastre, C_D , para cables en función al número de Reynolds R_e .

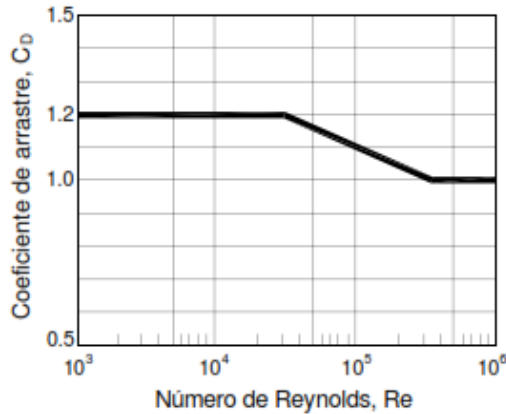


Figura 4. 19 Coeficiente de arrastre C_D para cables (Holmes, 2001).

c) Ángulo de ataque, θ .

Se considera como el ángulo de incidencia del viento en relación al eje de la línea de transmisión. Al tener un ángulo de deflexión de 10° , el ángulo de ataque del viento se representa en la Figura 4. 16.

d) Factor de reducción del claro, α

Este factor permite reducir los valores pico de la velocidad del viento a lo largo del claro debido a la no simultaneidad de las ráfagas. Está en función del tipo de terreno y la altura media del cable. Se determina como (Holmes, 2001):

$$\alpha = 0.58 + 0.42e^{\left(-\frac{s}{180}\right)} \quad \text{Para terreno rural} \quad \text{Ec. 4. 46}$$

$$\alpha = 0.58 + 0.50e^{\left(-\frac{s}{140}\right)} \quad \text{Para terreno urbano} \quad \text{Ec. 4. 47}$$

En donde s es la distancia del claro del cable, en metros. Se consideró un factor de reducción para terreno urbano, considerando que representa mayor peligro el colapso de una torre de situada en esta clasificación del terreno.

4.5.4. Cálculo de las acciones del viento sobre los cables

Las fuerzas producidas en los cables ante la acción del viento, para 50 km/h se expresan de la Tabla 4. 14 a laTabla 4. 16.

Tabla 4. 14 Datos generales para obtener las fuerzas del viento sobre los cables.

DATOS			
V_R	50	km/h	
Dirección del viento	0°	90°	45°
Ángulo θ_w	80	10	55
α	0.63	t rural	
	0.53	t urbano	

Tabla 4. 15 Altura promedio de los cables.

	ϕ (m)	z (m)	h (m)	Z_{cable} (m)	Z_{prom} (m)
Conductor 1	0.032	24.58	5.36	19.22	21.90
Conductor 2	0.032	33.08	5.36	27.72	30.40
Conductor 3	0.032	41.58	5.36	36.22	38.90
Cable de guarda	0.0095	49.58	3.32	46.26	47.92

Tabla 4. 16 Cálculo de carga uniforme para cables.

	ϕ (m)	Frz	V_D (km/h)	Re	q_z (kg/m ²)	C_D	w_c (kg/m)		
							VIENTO A 0°	90°	45°
Conductor 1	0.032	1.106	55.28	3.28E+04	14.67	1.198	0.277	0.009	0.191
Conductor 2	0.032	1.153	57.65	3.42E+04	15.95	1.197	0.298	0.009	0.206
Conductor 3	0.032	1.190	59.50	3.53E+04	16.99	1.196	0.315	0.010	0.218
Cable de guarda	0.0095	1.222	61.10	1.07E+04	17.92	1.200	0.105	0.003	0.072

4.6 METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA

En general las funciones de vulnerabilidad pueden evaluarse mediante una o varias técnicas, entre las cuales se incluyen:

- Estudios analíticos o modelos analíticos calibrados.
- Estudios experimentales o pruebas de laboratorio.
- Observaciones del comportamiento de estructuras durante eventos de intensidad conocida o estimada.
- Funciones publicadas en artículos de divulgación científica o de la experiencia de expertos por medio de publicaciones y reportes.

El procedimiento básico para obtener las funciones de vulnerabilidad para la infraestructura expuesta, consiste en identificar el daño esperado en el inmueble para diferentes velocidades de viento.

Se realizó un análisis estático lineal sin considerar la sobrerresistencia de los elementos para la torre de transmisión y los cables que componen la porción de línea de transmisión, mediante el programa SAP2000 (CSI, 2013). Primero se analizaron las fuerzas del viento ocasionadas por las velocidades mencionadas en la sección 4.5.2 en la torre de transmisión, después se consideró el efecto del viento en los cables conductores y de guarda para aplicar las reacciones en la torre y obtener el daño de la línea de transmisión.

Con ayuda del comando “Start steel design/Check of Structure” se obtuvo la relación de capacidad para los elementos de la torre de transmisión con base al reglamento AISC – LRDF 99. El cual está basado en la relación $\frac{P_u}{\phi P_n}$. Una relación de capacidad mayor a 1.0 indica que el elemento ha excedido su estado límite de capacidad.

Cuando $\frac{P_u}{\phi P_n} \geq 0.2$ la relación de capacidad está dada por:

$$\frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{u33}}{\phi_b M_{n33}} + \frac{M_{u22}}{\phi_b M_{n22}} \right) \quad \text{Ec. 4. 48}$$

Cuando $\frac{P_u}{\phi P_n} < 0.2$ la relación de capacidad está dada por:

$$\frac{P_u}{2\phi P_n} + \left(\frac{M_{u33}}{\phi_b M_{n33}} + \frac{M_{u22}}{\phi_b M_{n22}} \right) \quad \text{Ec. 4. 49}$$

En donde:

P_u = Fuerza axial factorizada, en kgf.

P_n = Carga axial nominal, en kgf.

M_{u33}, M_{u22} = Momento factorizado en mayor y menor dirección, en kg-cm.

M_{u33}, M_{u22} = Momento nominal en mayor y menor dirección, en kg-cm.

ϕ = Factor de reducción para tensión o compresión, 0.90 ó 0.85 respectivamente. Para ángulos a compresión equivale a 0.90.

ϕ_b = Factor de reducción para flexión = 0.90.

La combinación de carga que se utilizó fue: 1.4 Carga Muerta + 1.0 Cables, herrajes y accesorios + 1.0 Fuerzas de Viento. Se consideró un 40% más de la carga muerta debido a las conexiones, y el factor unitario para el peso de cables, herrajes y accesorios y fuerzas del viento debido a que son las condiciones que se presentan en el tiempo de servicio.

Al momento de presentarse la falla en algún elemento, se le asignan “Releases” de carga axial y momentos en las uniones con otros elementos, para conferirle la incapacidad de transmitir las acciones y simular la falla.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos por Prasad Rao *et al.* (2010) en pruebas a escala completa de torres de transmisión, se consideraron modos de falla sin desplome de estructura y con desplome de estructura.

Las fallas sin desplome de estructura, o fallas secundarias, se consideraron como imperfecciones que aún en su presencia permiten el funcionamiento de la línea de transmisión. Se consideraron como:

- Dos elementos secundarios sobreesforzados en uno o dos lados del panel ($R > 1$).
- Sobreesfuerzo de uno o dos montantes en uno de los lados de los paneles inferiores o en uno de los lados de dos paneles antes o después del panel de las crucetas.
- Sobreesfuerzo de una sección o de toda la longitud de una o dos piernas en algún panel.

Las fallas que originan el colapso de la torre para transmisión eléctrica, o fallas principales, se consideraron cuando:

- Fallan todos los elementos secundarios en dos o más lados de dos paneles consecutivos.
- Fallan las cuatro piernas de dos paneles consecutivos.
- Fallan todos los elementos secundarios del panel inferior a la cruceta en dos o más lados del panel.
- Fallan dos piernas y los elementos secundarios entre ellas y elementos secundarios en la parte lateral del panel.
- Falla cualquiera de las vigas en las crucetas.
- Fallan todos los elementos de dos o más paneles consecutivos.
- Fallan hasta tres piernas y hasta dos diagonales entre ellas o en el mismo panel en 3 paneles consecutivos
- Fallan las columnas y hasta dos montantes de un panel

Por medio de inspección se dedujeron los mecanismos de falla ocurridos en la torre para las diferentes velocidades de viento en cada dirección. En la Tabla 4. 17 se señalan los diferentes mecanismos y la cantidad de los mismos y en las Figura 4. 20 y Figura 4. 21 se muestran las fallas ocasionadas (elementos color rojo) por el viento a una velocidad de 120 y 125 km/h respectivamente, con un ángulo de ataque de 45°.

Se asignó un valor máximo de daño de 30% si se presentaban 16 de las fallas secundarias y de 100% si se presentaban 4 fallas principales. Seguidamente se realizó la suma del daño ocasionado por las fallas secundarias y principales para obtener el valor total del daño ocasionado por la velocidad de viento seleccionada.

Con los valores obtenidos se traza la curva de vulnerabilidad para la dirección del viento analizada, como se puede ver en la Figura 4. 22.

Tabla 4. 17 Mecanismos de falla en la estructura.

MECANISMOS DE FALLA			
		VIENTO A 45°	
		120 km/h	125 km/h
Fallas secundarias			
1	Dos elementos secundarios sobreesforzados en uno o dos lados del panel ($R > 1$).	1	2
2	Sobreesfuerzo de uno o dos montantes en uno de los lados de los paneles inferiores o en uno de los lados de dos paneles antes o después del panel de las crucetas.		
3	Sobreesfuerzo de una sección o de toda la longitud de una o dos piernas en algún panel.		
	TOTAL	1	2
	% DAÑO	0.01875	0.0375
Fallas principales			
4	Fallan todos los elementos secundarios en dos o más lados de dos paneles consecutivos.		
5	Fallan las cuatro piernas de dos paneles consecutivos.		
6	Fallan todos los elementos secundarios del panel inferior a la cruceta en dos o más lados del panel.		
7	Fallan dos piernas y los elementos secundarios entre ellas y elementos secundarios en la parte lateral del panel.		
8	Falla cualquiera de las vigas en las crucetas.		
9	Fallan todos los elementos de dos o más paneles consecutivos.		
10	Fallan hasta tres piernas y hasta dos diagonales entre ellas o en el mismo panel en 3 paneles consecutivos		
11	Fallan las columnas y hasta dos montantes de un panel		
12	Fallan todos los elementos secundarios en dos o más lados de dos paneles consecutivos.		
	TOTAL	0	0
	% DAÑO	0	0
	DAÑO TOTAL	0.01875	0.0375

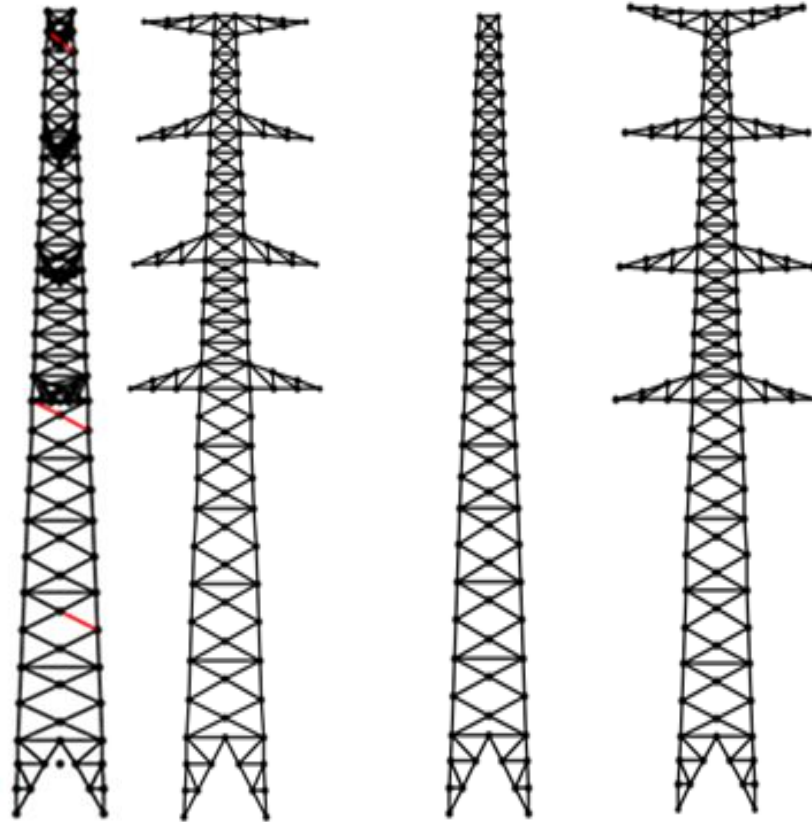


Figura 4. 20 Fallas ocasionadas por viento de 120 km/h a 45°

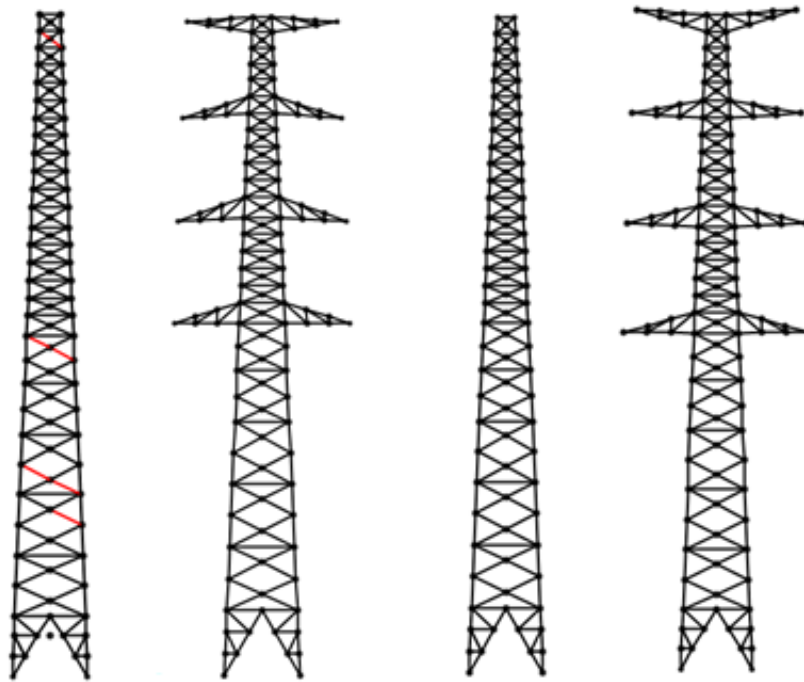


Figura 4. 21 Fallas ocasionadas por viento de 125 km/h a 45°

Para comprobar los resultados, para cada dirección del viento, se obtuvo la curva de capacidad Fuerza cortante - desplazamiento en el panel superior, para la estructura sin cables y con la presencia de los mismos. En la Figura 4. 23 se muestra la curva de capacidad Fuerza cortante-desplazamiento correspondiente a la dirección de viento a 45° sin considerar el efecto de los cables, y en la Figura 4. 24 se muestra la curva de capacidad Velocidad del viento – desplazamiento. La torre de transmisión tiende a comportarse de manera lineal, presentando una falla frágil a una velocidad de 155 km/h, lo que se traduce en una curva de vulnerabilidad con una pendiente elevada.

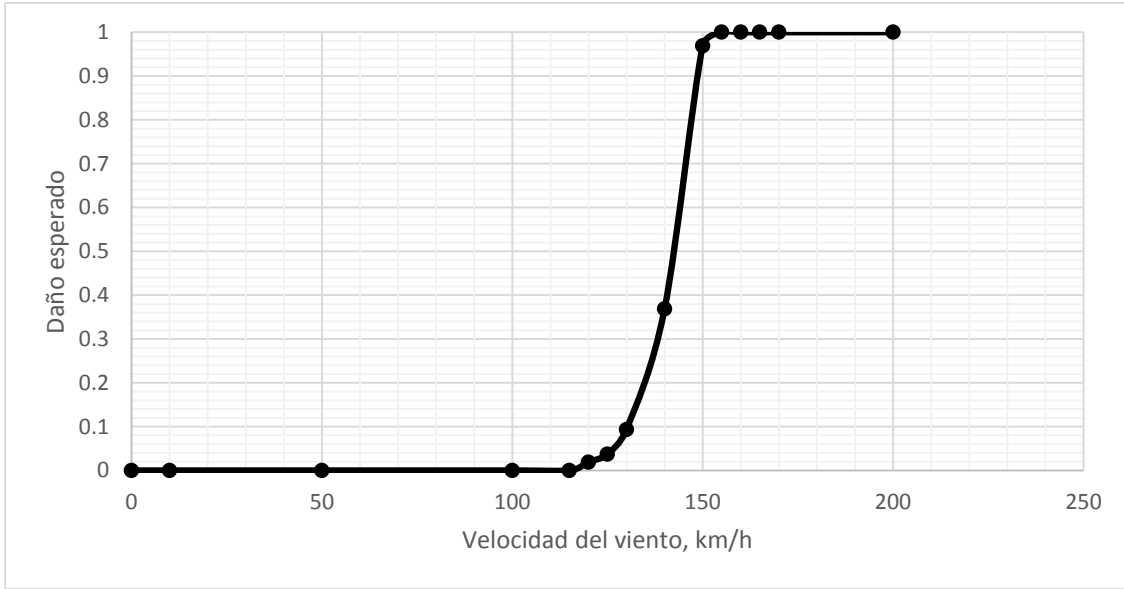


Figura 4. 22 Curva de vulnerabilidad para viento a 45° sin considerar el efecto de los cables.

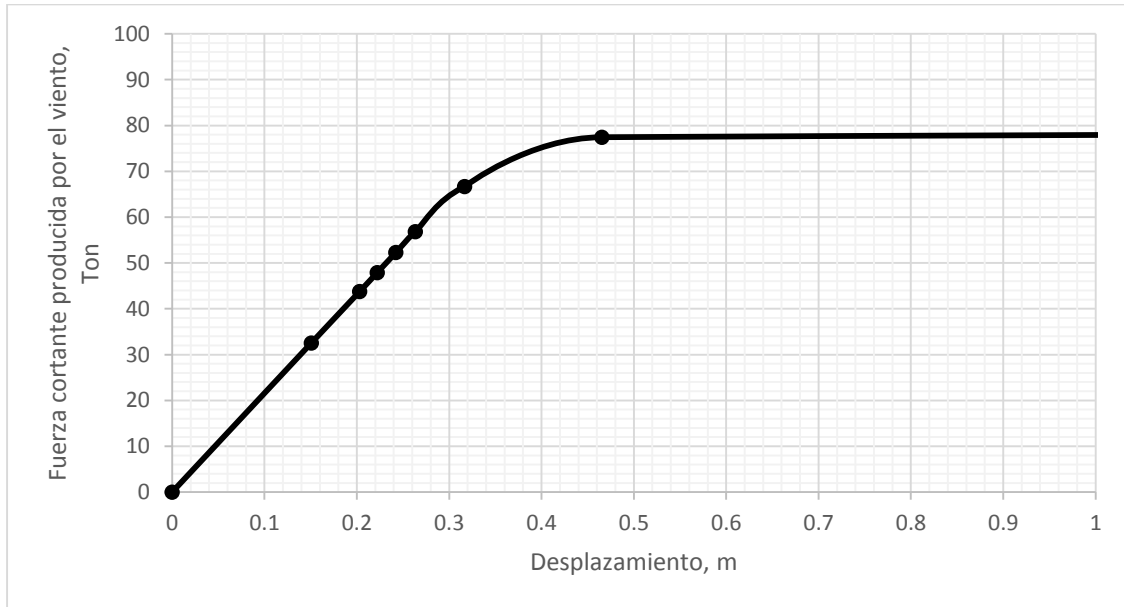


Figura 4. 23 Curvas de capacidad estructural sin considerar el efecto de los cables.

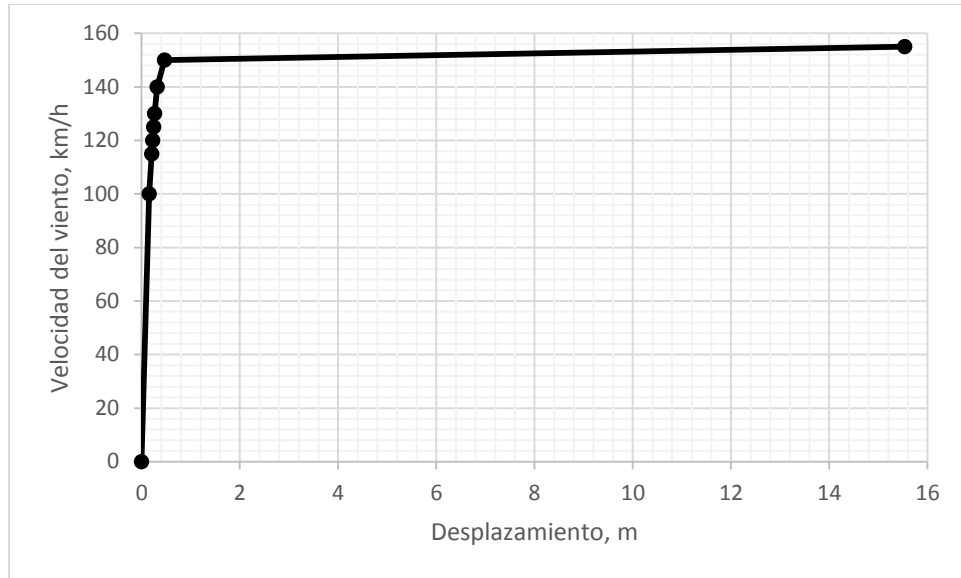


Figura 4. 24 Curva de capacidad estructural Velocidad – desplazamiento, viento a 45°.

Una vez obtenidas las curvas de capacidad, se llevó a cabo un procedimiento similar al sugerido por el Consorcio Evaluación de Riesgos Naturales en América Latina (ERN–LA, 2011) para obtener el daño esperado ante un evento sísmico y con ello encontrar los parámetros estructurales que describen el comportamiento de una torre para transmisión eléctrica. Aplicando la Ec. 4. 50 se puede obtener el valor del daño, β , esperado para velocidad de viento, I .

$$E(\beta|I) = 1 - \exp\left(\ln\left[0.5\left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right)^\rho\right]\right) \quad \text{Ec. 4. 50}$$

En donde:

$E(\beta|I)$ = Valor de daño esperado ante una intensidad.

γ = Desplazamiento en el panel superior.

$\bar{\gamma}$ = Desplazamiento correspondiente al 50% de daño. En el estudio realizado se consideró como la mitad del desplazamiento entre el que ocasiona la primer falla y el valor anterior al colapso.

ρ = Parámetro que describe el comportamiento estructural. Este valor se tomó igual a 10.

Esta metodología se efectuó para cada dirección de viento, así como con y sin el efecto del viento en los cables. En la Tabla 4. 18 se presentan los datos de la curva de capacidad de la torre de transmisión para el viento a 45° sin considerar los cables, así como los valores del daño esperado obtenido por inspección y con la Ec. 4. 50. De igual manera en la Figura 4. 25 se representan las curvas obtenidas por inspección con una línea continua y las obtenidas con la ecuación de daño con una línea punteada.

Tabla 4. 18 Daño esperado para viento a 45° sin considerar el efecto de los cables

Velocidad (km/h)	Fuerza cortante (t)	Desplazamiento (m)	$E(\beta I)$	
			Inspección	Ec. 4. 50
0	0	0	0.00	0.00
100	32.58	0.1509	0.00	0.00
115	43.78	0.2031	0.00	0.00
120	47.92	0.2222	0.02	0.01
125	52.29	0.2423	0.04	0.02
130	56.87	0.2634	0.09	0.04
140	66.69	0.3167	0.37	0.20
150	77.45	0.4655	0.97	1.00
155	83.06	15.5355	1.00	1.00
200			1.00	1.00
	$\bar{\gamma} =$	0.3539		
	$\rho =$	10		

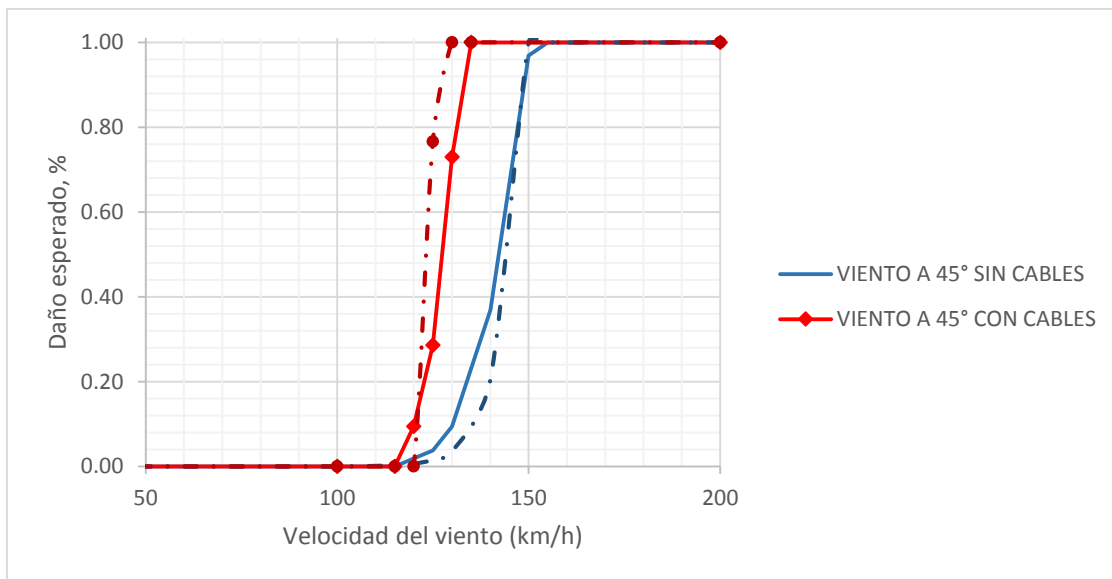


Figura 4. 25 Curvas de vulnerabilidad obtenidas por inspección (línea continua) y con la ecuación de daño (línea punteada).

Se puede observar que el resultado obtenido con la ecuación de daño para el viento sin cables subestima el valor del daño obtenido por inspección, así como para el caso con cables se sobreestima, sin embargo se buscaban los parámetros $\bar{\gamma}$ y ρ que describiera lo más parecido posible el comportamiento de la torre de transmisión.

4.7 CURVAS DE VULNERABILIDAD

En la Figura 4. 26 se presentan las curvas de vulnerabilidad obtenidas para la torre de transmisión sin considerar los efectos del viento sobre los cables. En la Figura 4. 27 se presentan las curvas considerando la acción del viento sobre los cables. De igual manera en la Figura 4. 28 se presenta el conjunto de las curvas de vulnerabilidad obtenidas para la torre de transmisión estudiada.

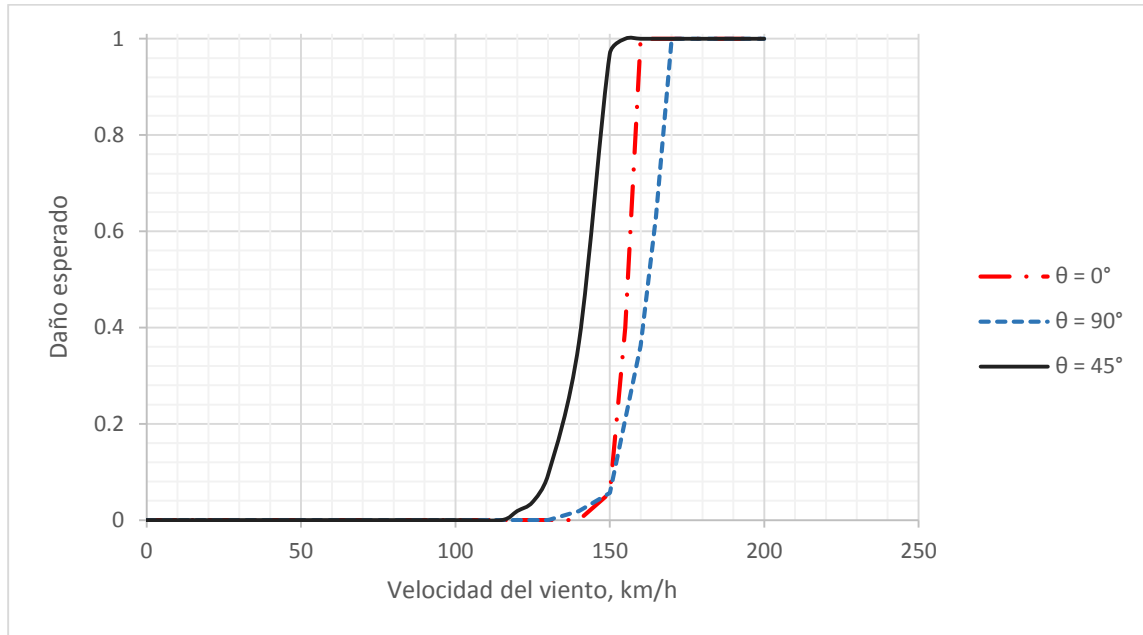


Figura 4. 26 Curvas de vulnerabilidad sin considerar el efecto del viento en los cables.

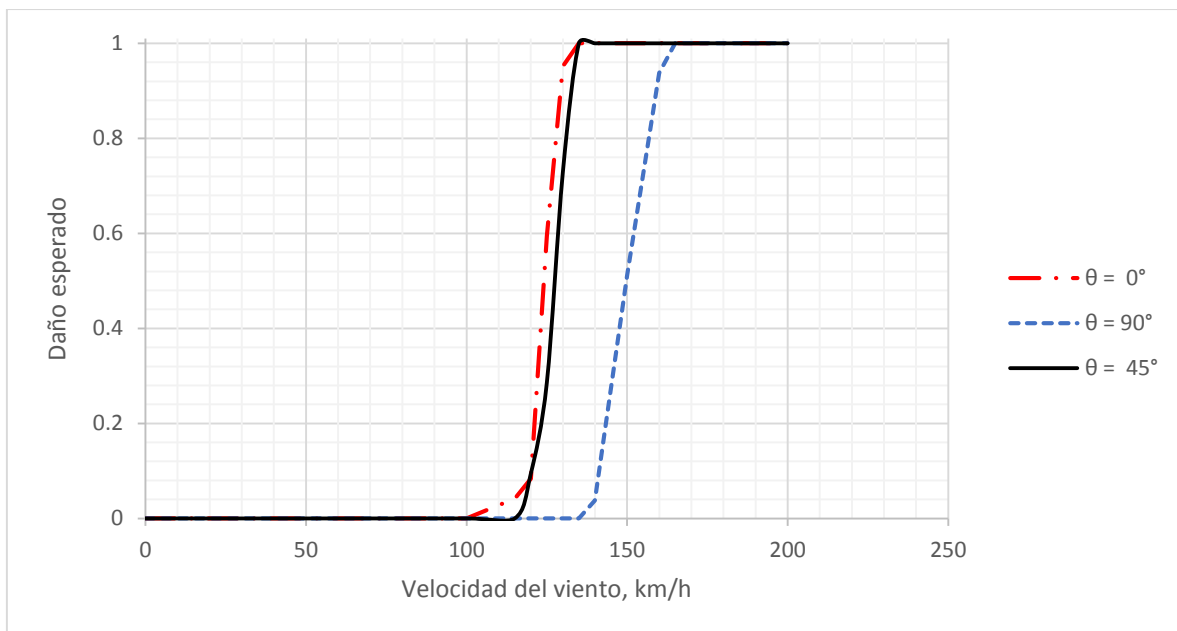


Figura 4. 27 Curvas de vulnerabilidad considerando el efecto del viento en los cables.

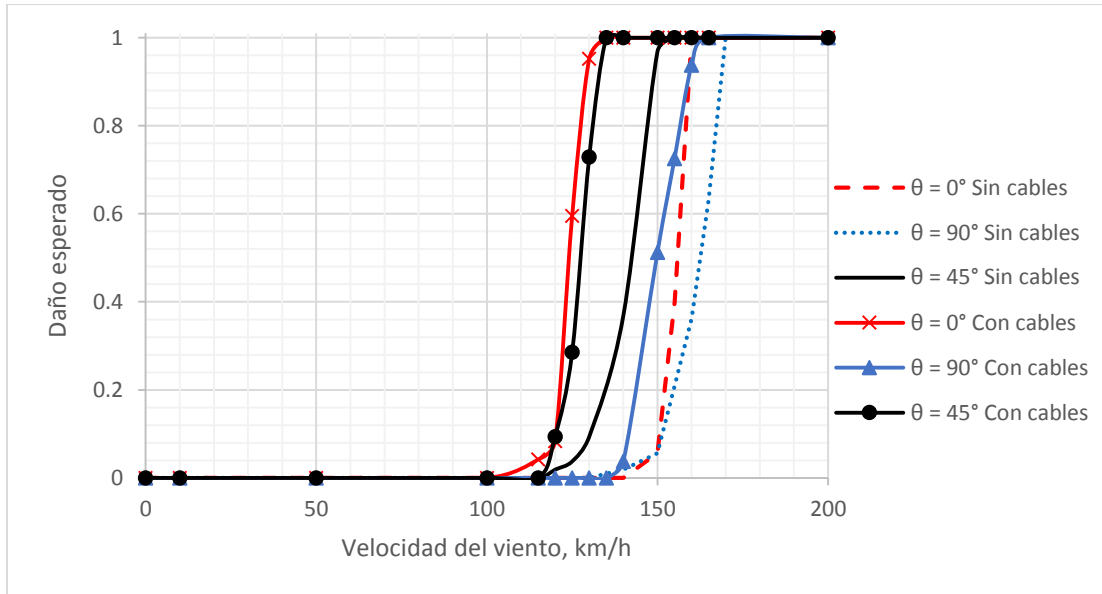


Figura 4. 28 Conjunto de curvas de vulnerabilidad para la torre de transmisión 53T10.

Se realizó el promedio de todas las curvas para obtener aquella que describa el comportamiento estructural de la torre de transmisión eléctrica, de igual manera se obtuvo la varianza de los datos de manera estadística para cada velocidad de viento. En la Figura 4. 29 se presenta la curva de vulnerabilidad (FVU) y la varianza para la torre de transmisión 53T10.

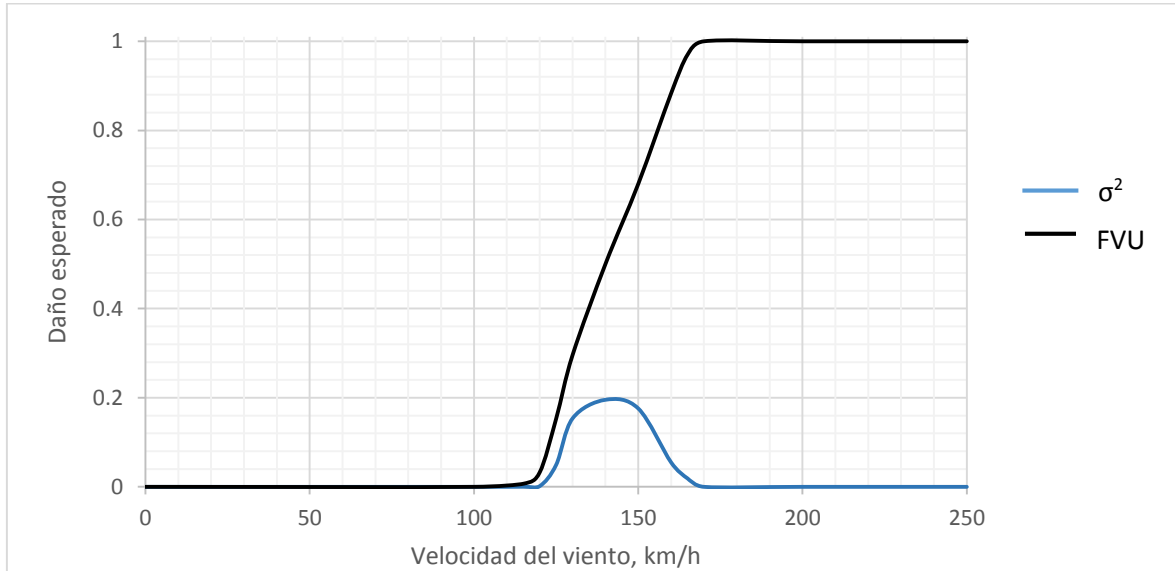


Figura 4. 29 Curva de vulnerabilidad para la torre de transmisión 53T10.

La función de vulnerabilidad se puede representar con la función de distribución log – normal. Esta distribución tiende a la función de densidad de probabilidad mostrada en la Ec. 4. 51 .

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \tag{Ec. 4. 51}$$

En donde:

μ = Media del logaritmo de la variable.

σ = Desviación estándar del logaritmo de la variable.

Se pueden utilizar los mismos procedimientos que para una distribución normal si la Ec. 4. 51 se reescribe como:

$$f_L(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x} f_N(\ln x; \mu, \sigma) \quad \text{Ec. 4. 52}$$

En donde:

f_L = Función de densidad de probabilidad de distribución log – normal

f_N = Función de densidad de probabilidad de distribución normal.

Para determinar la distribución de probabilidad

$$F_L(x) = \int_0^x \frac{1}{t} f_N(\ln t; \mu, \sigma) dt = F_N(\ln x; \mu, \sigma) \quad \text{Ec. 4. 53}$$

Donde:

F_N = Distribución de probabilidad acumulada de distribución normal, que puede ser obtenida en tablas estadísticas.

Utilizando el valor de la desviación estándar igual a 0.1 y el de la media como 141.25, este último valor se obtuvo considerando el promedio de las velocidades a las cuales ocurre el 50% de daño, se obtuvo la curva de vulnerabilidad parametrizada como se muestra en la Figura 4. 30.

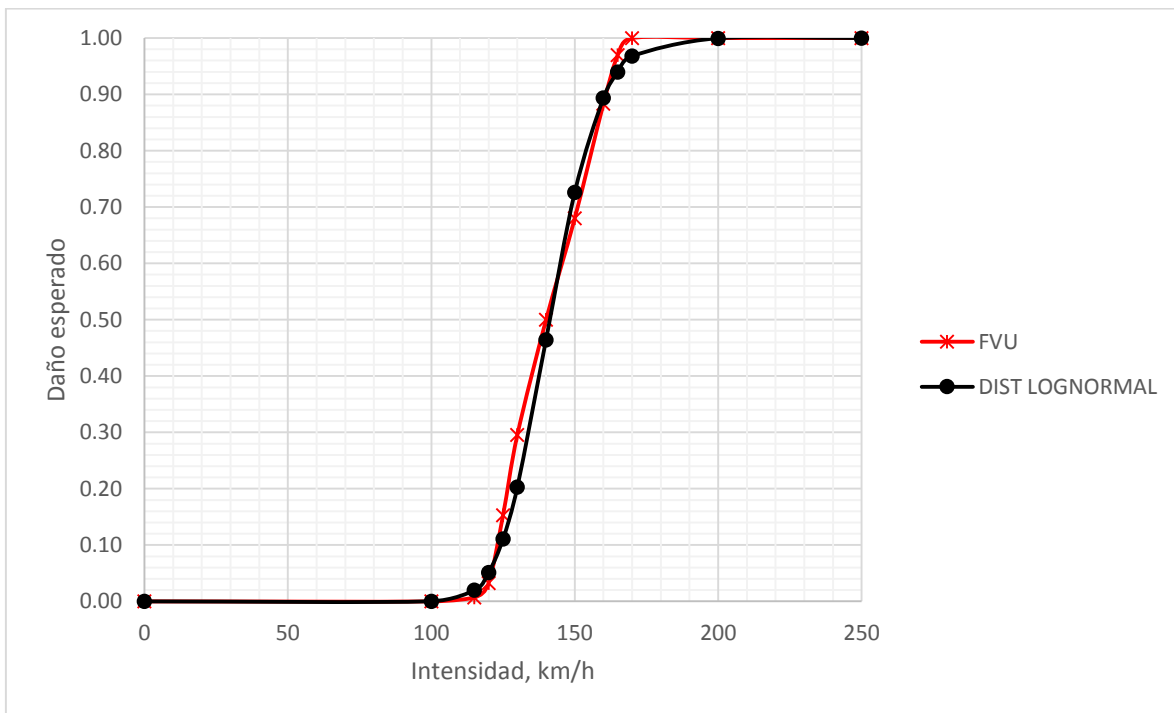


Figura 4. 30 Curva de vulnerabilidad parametrizada.

Es importante señalar que la curva de vulnerabilidad obtenida refleja el comportamiento estructural de una línea de transmisión con claros de 400 m con torres de suspensión 53T10 diseñadas para una velocidad regional de viento de 115 km/h correspondiente a un periodo de retorno de 50 años, calibrada para velocidades de viento producidas por huracanes. Al presentarse alguna modificación como: la altura de la torre, la diagonalización de los elementos o distancia de los claros, la curva de vulnerabilidad no será aplicable.

Un método alternativo para obtener rápidamente la curva de vulnerabilidad para este tipo de torres de transmisión es utilizando la Ec. 4. 54 y el parámetro ρ igual a 10. Se reemplazaron los valores de γ y $\bar{\gamma}$ en la Ec. 4. 50 por V y \bar{V} , respectivamente, para obtener directamente el daño esperado ante la intensidad de la velocidad de viento.

$$E(\beta|I) = 1 - \exp\left(\ln\left[0.5\left(\frac{V}{\bar{V}}\right)^\rho\right]\right) \quad \text{Ec. 4. 54}$$

En donde:

V = Velocidad del viento.

\bar{V} = Velocidad del viento para la cual ocurre el 50% de daño. Se consideró como la velocidad promedio correspondiente al $\bar{\gamma}$ de todas las condiciones de falla.

De igual manera se obtuvo la varianza siguiendo el procedimiento sugerido en el informe ATC-13 considerando una varianza máxima, v_{max} , igual a 0.21 equivalente a la varianza máxima de los datos obtenidos, y el nivel de daño para el que ocurre la varianza máxima, D_0 , igual a 0.5.

En la Figura 4. 31 se muestra la curva de vulnerabilidad y la varianza obtenida con la ecuación de daño y el método del informe ATC-13, respectivamente.

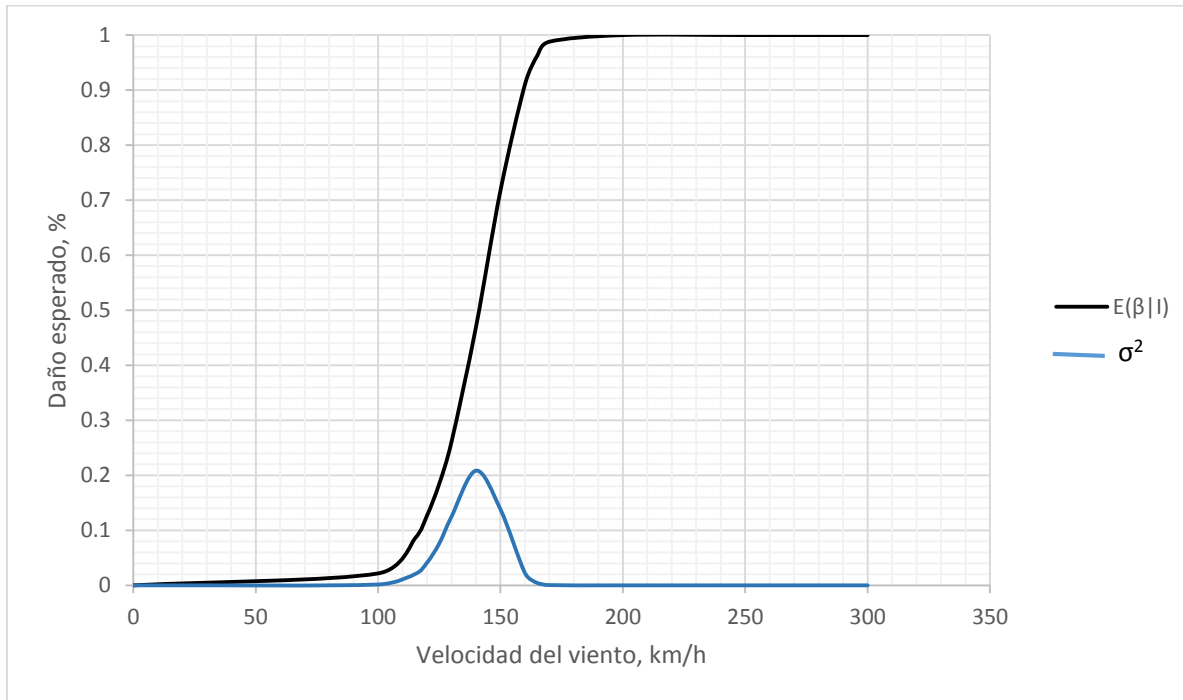


Figura 4. 31 Curvas de vulnerabilidad y varianza obtenidas con la ecuación de daño y método ATC.

4.8 REPRESENTACIÓN DIGITAL DE LAS CURVAS DE VULNERABILIDAD

Para obtener el análisis del riesgo es necesario representar digitalmente las curvas de vulnerabilidad en un archivo con extensión *.fvu*, el cual es compatible con el software especializado para el cálculo del riesgo.

Un archivo *.fvu* es un archivo de texto donde se almacena la información de funciones de vulnerabilidad, el cual se representa en la Figura 4. 32.

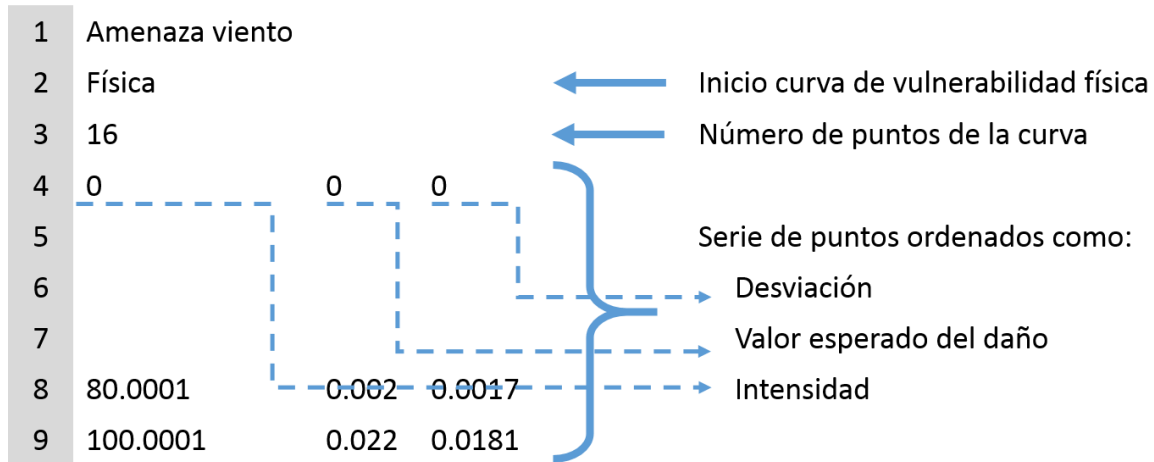


Figura 4. 32 Descripción de archivo *.fvu*

El nombre asignado a la curva de vulnerabilidad puede ser un conjunto de letras y números, por ejemplo:

V_MEX_TR_ATT_A_00_2014_N_10_53T

Donde cada conjunto de caracteres representa lo indicado en la Tabla 4. 19.

El nombre de la función de vulnerabilidad debe ser redactado en la columna correspondiente a la vulnerabilidad para la amenaza analizada en el archivo generador del shape de base de datos, tal como se muestra en la Figura 4. 33. De esta forma se relacionan los elementos con las curvas de vulnerabilidad.

Tabla 4. 19 Descripción del formato del nombre de la función de vulnerabilidad.

CARACTERES	No. DE CARACTERES	CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
V	1	Peligro	Tipo de amenaza para la cual se realizó la función de vulnerabilidad.
MEX	3	País	Se asigna el país en donde se está destinando la función de vulnerabilidad.
TR	2	Uso	Especifica donde se usará la función. En este caso Transmisión.
TTE	3	ID estructural	Especifica cómo es identificado el tipo de estructura.
A	1	Material	Se indica el tipo de material del cual se conforma el identificador estructural.
00	2	Niveles o claros	Número de niveles o claros de acuerdo al tipo de estructura.
0000	4	Año de construcción	Se indica el año de creación de la función de vulnerabilidad.
N	1	Daño	Se indica el nivel de daño asociado a la estructura.
10	2	Ángulo de deflexión	Ángulo de deflexión de la torre de transmisión.
53T	3	Altura, profundidad, etc.	Característica adicional.

ID	ESTADO	No_TORRES	VALFIS	VALHUM	SE_VIENTO
1.0	Hidalgo	162.000000	419964.300000	0.000000	V_MEX_TR_ATT_A_00_2014_N_10_53T
2.0	Hidalgo	77.000000	419964.300000	0.000000	V_MEX_TR_ATT_A_00_2014_N_10_53T
3.0	Puebla	503.000000	419964.300000	0.000000	V_MEX_TR_ATT_A_00_2014_N_10_53T
4.0	Puebla	178.000000	419964.300000	0.000000	V_MEX_TR_ATT_A_00_2014_N_10_53T
5.0	Puebla	173.000000	419964.300000	0.000000	V_MEX_TR_ATT_A_00_2014_N_10_53T
6.0	Campeche	278.000000	419964.300000	0.000000	V_MEX_TR_ATT_A_00_2014_N_10_53T
7.0	Campeche	234.000000	419964.300000	0.000000	V_MEX_TR_ATT_A_00_2014_N_10_53T
8.0	Campeche	61.000000	419964.300000	0.000000	V_MEX_TR_ATT_A_00_2014_N_10_53T
9.0	Campeche	19.000000	419964.300000	0.000000	V_MEX_TR_ATT_A_00_2014_N_10_53T

Figura 4. 33 Archivo generador del shape de base de datos.

CAPÍTULO 5

CÁLCULO PROBABILISTA DEL RIESGO

5.1 DEFINICIÓN DE RIESGO

El riesgo se puede definir como una medida de los daños o pérdidas por la ocurrencia de un fenómeno natural o antropológico, descrito anteriormente como amenaza, en un período de retorno específico, expresado en términos económicos o número de víctimas o heridos.

El riesgo se obtiene al relacionar directamente el peligro o amenaza, la vulnerabilidad de las estructuras y costo de reposición de las mismas. De manera resumida: *riesgo = peligro x vulnerabilidad x costo*.

5.2 MÉTODO PROBABILISTA PARA EL CÁLCULO DEL RIESGO

El procedimiento de cálculo probabilista consiste básicamente en evaluar las pérdidas en el grupo de activos expuestos durante cada uno de los escenarios que describen la amenaza, y luego integrar probabilísticamente los resultados obtenidos utilizando como factores de peso las frecuencias de ocurrencia de cada escenario. El análisis probabilista de riesgo involucra incertidumbres que no pueden despreciarse y deben considerarse a lo largo del proceso de cálculo.

La evaluación de riesgo requiere de tres pasos de análisis:

1. **Evaluación de la amenaza:** se define un conjunto de eventos, con sus respectivas frecuencias de ocurrencia, que representan la amenaza.
2. **Definición del inventario de elementos expuestos:** debe especificarse la localización geográfica del bien expuesto más el valor físico o costo de reposición, valor humano o número de ocupantes y las características que definen el comportamiento estructural ante la amenaza que se desee evaluar.
3. **Vulnerabilidad de las construcciones:** a cada una de las clases estructurales se le asigna una función de vulnerabilidad para cada amenaza que caracteriza el comportamiento de la misma ante un fenómeno amenazante.

Para calcular las pérdidas, se obtiene el porcentaje de daño con la curva de vulnerabilidad dada una intensidad, éste es traducido a pérdidas económicas multiplicándolo por el valor de reposición del bien en riesgo, operación que se repite para cada tipo de activo, en cada localización, para después integrar las pérdidas según lo requerido.

Usando como base el teorema de probabilidad total, se obtienen las frecuencias, usualmente anuales, con que ocurrirán eventos en que se exceda un valor especificado de pérdidas (Ec. 5. 1). Esta frecuencia se conoce como tasa de excedencia o curva de excedencia de pérdidas (*loss curve*) y describe el riesgo por amenazas naturales.

$$v(p) = \sum_{i=1}^{\text{Eventos}} \Pr(P > p | \text{Evento } i) F_A(\text{Evento } i) \quad \text{Ec. 5. 1}$$

En donde:

$v(p)$ = Tasa de excedencia de la pérdida p .

$\Pr(P > p | \text{Evento } i)$ = Probabilidad de que la pérdida sea superior a p , dado que ocurrió el i -ésimo evento.

$F_A(\text{Evento } i)$ = Frecuencia anual de ocurrencia del evento i .

La suma en la ecuación anterior se hace para todos los eventos potencialmente dañinos. El Inverso de $v(p)$ es el periodo de retorno de la pérdida p , identificado como Tr . La pérdida p es una cantidad incierta, cuyo valor no puede conocerse con precisión y debe ser tratada como una variable aleatoria.

La probabilidad de excedencia de la pérdida p , toma en cuenta las incertidumbres que existen en las funciones de vulnerabilidad y la incertidumbre de la intensidad en el sitio de interés, dado que ocurrió un evento, suele expresarse como indica la Ec. 5. 2:

$$\Pr(P > p | \text{Evento}) = \int_I \Pr(P > p | I) f(I | \text{Evento}) dI \quad \text{Ec. 5. 2}$$

En donde:

$\Pr(P > p | I)$ = Probabilidad de que la pérdida exceda el valor p dado que la intensidad local fue I .

$f(I | \text{Evento})$ = Es la densidad de probabilidades de la intensidad, condicionada a la ocurrencia del evento.

La secuencia de cálculo probabilista de riesgo es la siguiente:

1. Determinar la distribución de probabilidades de la pérdida de cada uno de los bienes expuestos dado un escenario.
2. A partir de ello, determinar la distribución de probabilidad de la suma de estas pérdidas, tomando en cuenta la correlación que existe entre ellas.
3. Calcular la probabilidad de que la anterior distribución exceda un valor determinado, p .
4. La probabilidad determinada en el inciso anterior, multiplicada por la frecuencia anual de ocurrencia del evento, es la contribución de este evento a la tasa de excedencia de la pérdida p .

5.3 ESTIMADORES DEL RIESGO

Es conveniente utilizar estimadores puntuales del riesgo que permitan expresarlo con un solo número que permita a las entidades encargadas de la toma de decisiones, contar con información esencial para la gestión de riesgos futuros. Las principales medidas del riesgo, en términos económicos, se describen a continuación:

- a) **Pérdida Anual Esperada:** indica, que si el proceso de ocurrencia de eventos fuera estacionario de aquí a la eternidad, su costo equivaldría al valor de la P_{AE} . Esta pérdida puede obtenerse por integración de $v(p)$; de forma discreta, se calcula con la suma del producto entre las pérdidas esperadas para determinado evento, $E(P|Evento i)$, y la probabilidad de ocurrencia de dicho evento en un periodo de un año, $P_A(Evento i)$, para todos los eventos estocásticos considerados (Ec. 5. 3). En términos probabilistas, la P_{AE} es la esperanza matemática de la pérdida anual.

$$P_{AE} = \sum_{i=1}^{Eventos} E(P|Evento i)P_A(Evento i) \quad Ec. 5. 3$$

- b) **Prima Pura de Riesgo:** la P_{PR} corresponde al valor de la P_{AE} dividido por el valor de reposición del activo. Indica el costo que debe ser pagado anualmente para cubrir las pérdidas esperadas en un evento futuro. Se expresa en porcentaje del valor de reposición.
- c) **Pérdida Máxima Probable (Probable Maximum Loss):** es una pérdida asociada a un periodo de retorno muy largo, entre 200 y 1500 años para compañías aseguradoras.
- d) **Curva de Excedencia de Pérdida:** la C_{EP} representa la frecuencia anual promedio con que determinada pérdida económica se verá excedida. Es la medida más importante en el manejo del riesgo, dado que brinda información básica para la planeación y destinación de recursos necesarios para cumplir con los objetivos de gestión particulares. La C_{EP} se puede calcular a partir del mayor evento probable en un año, o de manera uniforme para todos los eventos posibles, en función de su periodo de retorno. Generalmente se prefiere el segundo enfoque, dado que permite considerar más de un evento catastrófico al año.

5.4 EJEMPLO DE APLICACIÓN

Se realizó el análisis de riesgo eólico para líneas de transmisión con claros de 400 m con torres de suspensión 53T10 diseñadas para una velocidad regional de viento de 115 km/h correspondiente a un periodo de retorno de 50 años.

La amenaza corresponde a los huracanes que han impactado la República mexicana desde 1864 al 2012, como se muestra en la Tabla A. 1; los bienes expuestos analizados se consideraron tipo punto, ubicados en ciudades importantes y capitales de cada estado, tal como se muestra en la Figura 3. 10 y la curva de vulnerabilidad utilizada se muestra en la Figura 4. 29.

A pesar de ser líneas de transmisión adecuadas para el centro del país, se realizó el cálculo del riesgo en todo el país con la curva de vulnerabilidad obtenida en esta tesis con objeto de hacer ilustrativo el riesgo eólico de dichas estructuras.

5.4.1 Análisis por escenario único

Los resultados del cálculo del riesgo por escenario se muestran en de la Figura 5. 1 a la Figura 5. 9, los cuales representan las pérdidas ocasionadas por el paso del huracán o depresión tropical, según sea el caso, como única amenaza. Los eventos seleccionados se muestran en la Tabla 2. 6.

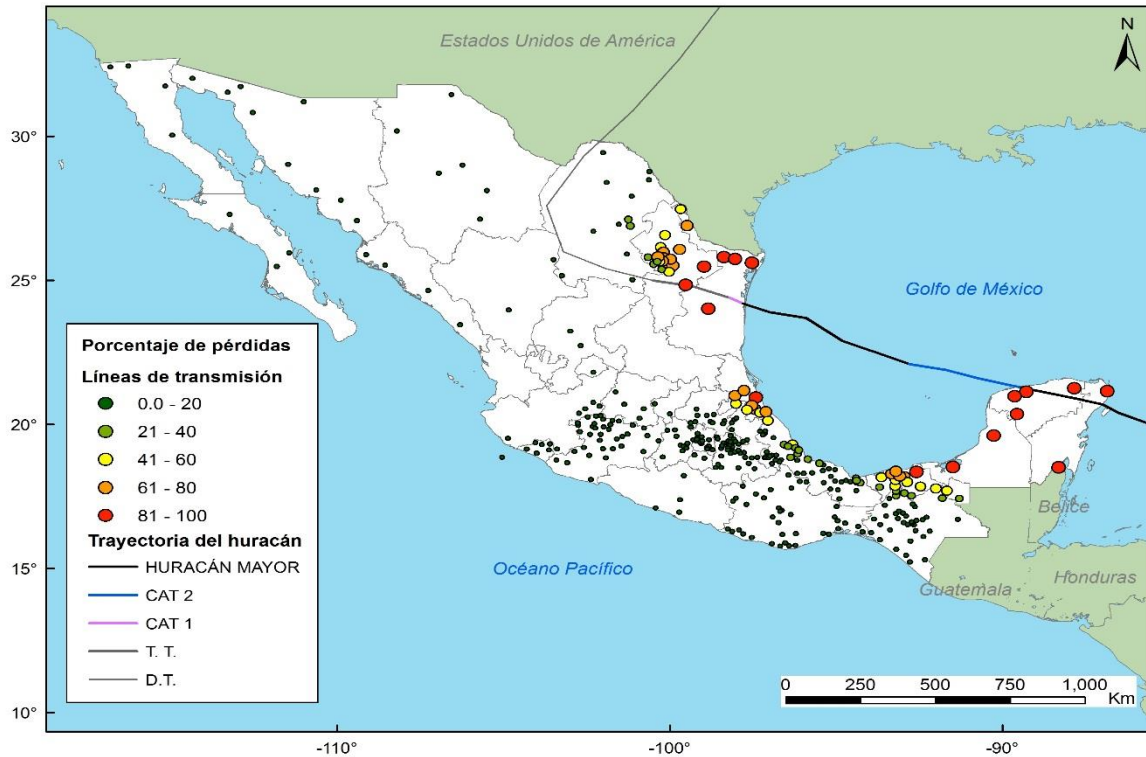


Figura 5. 1 Porcentaje de pérdidas. Huracán Gilberto.

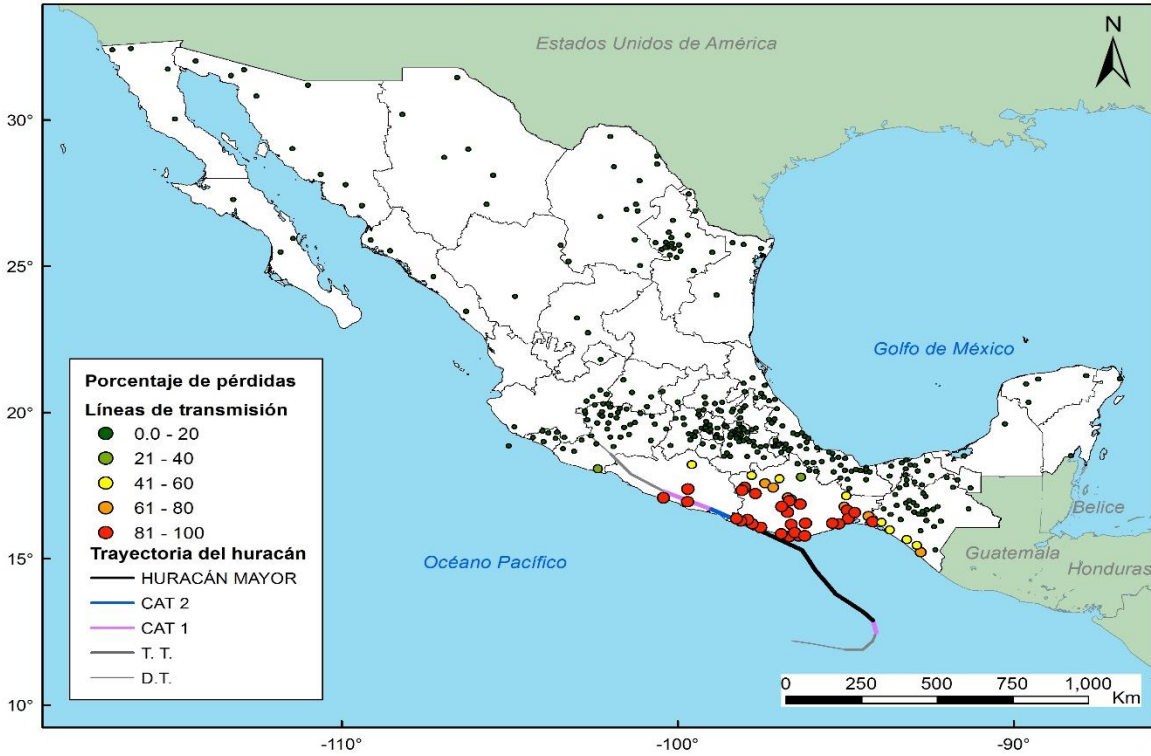


Figura 5. 2 Porcentaje de pérdidas. Huracán Paulina

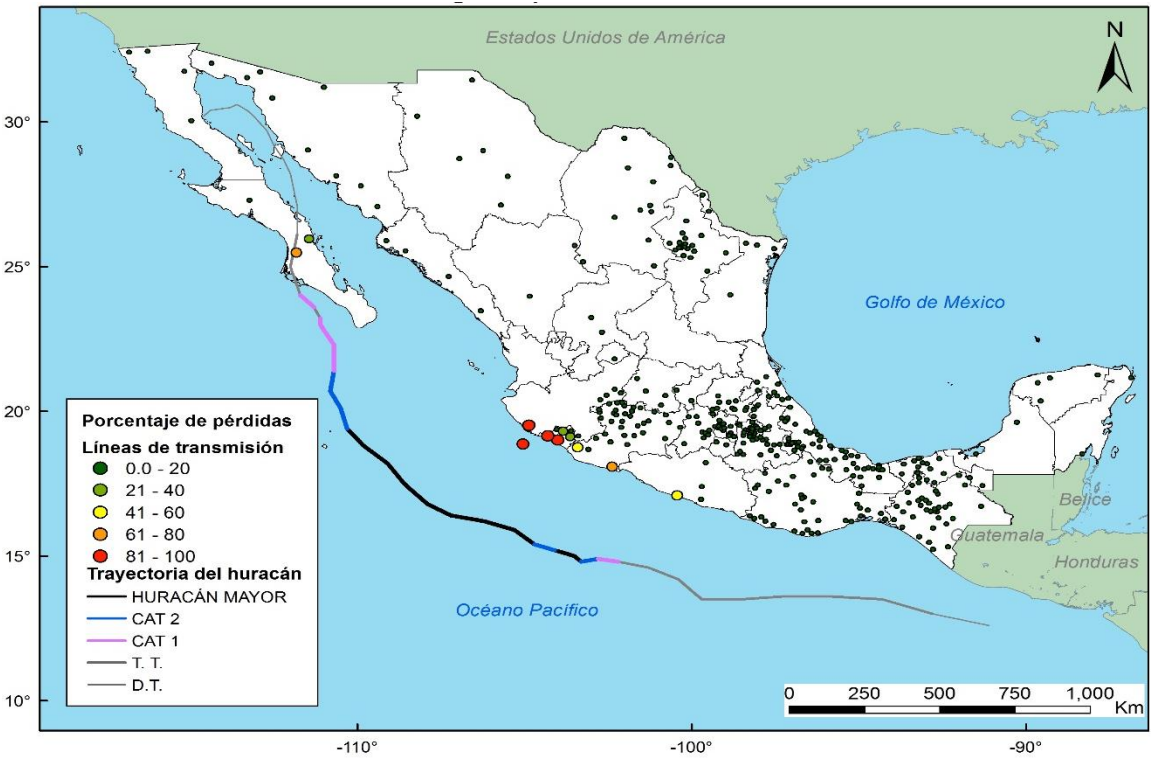


Figura 5. 3 Porcentaje de pérdidas. Depresión Juliette.

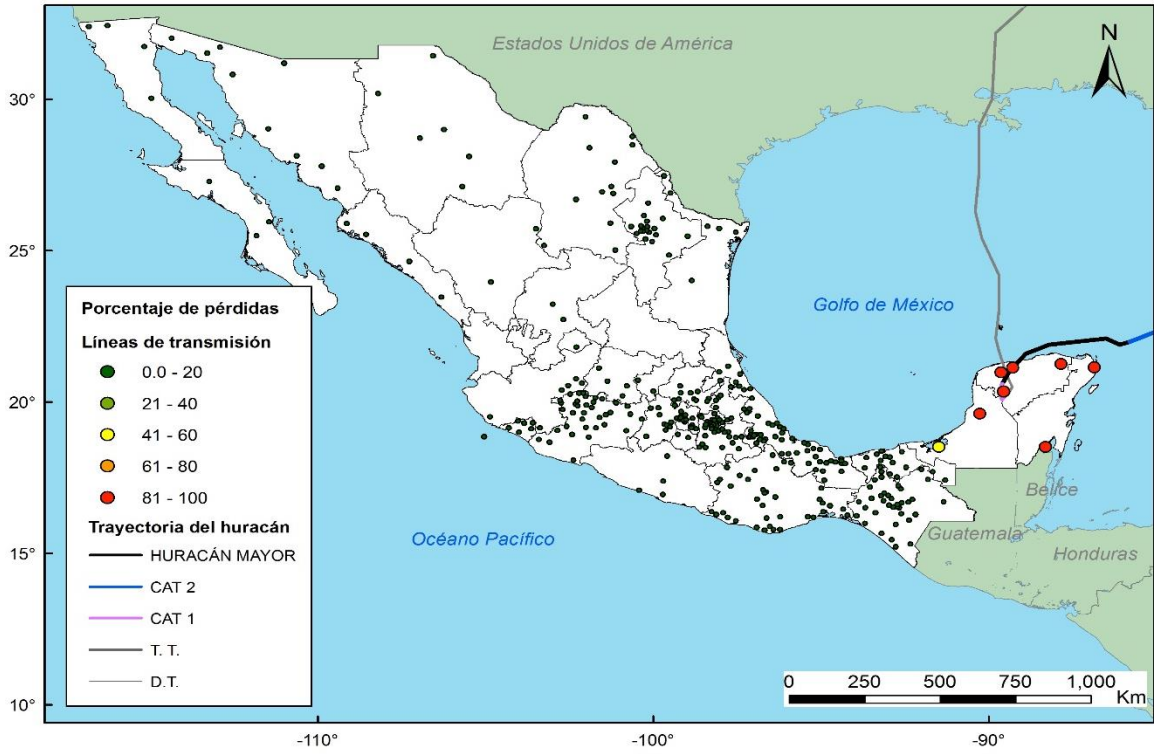


Figura 5. 4 Porcentaje de pérdidas. Huracán Isidore.

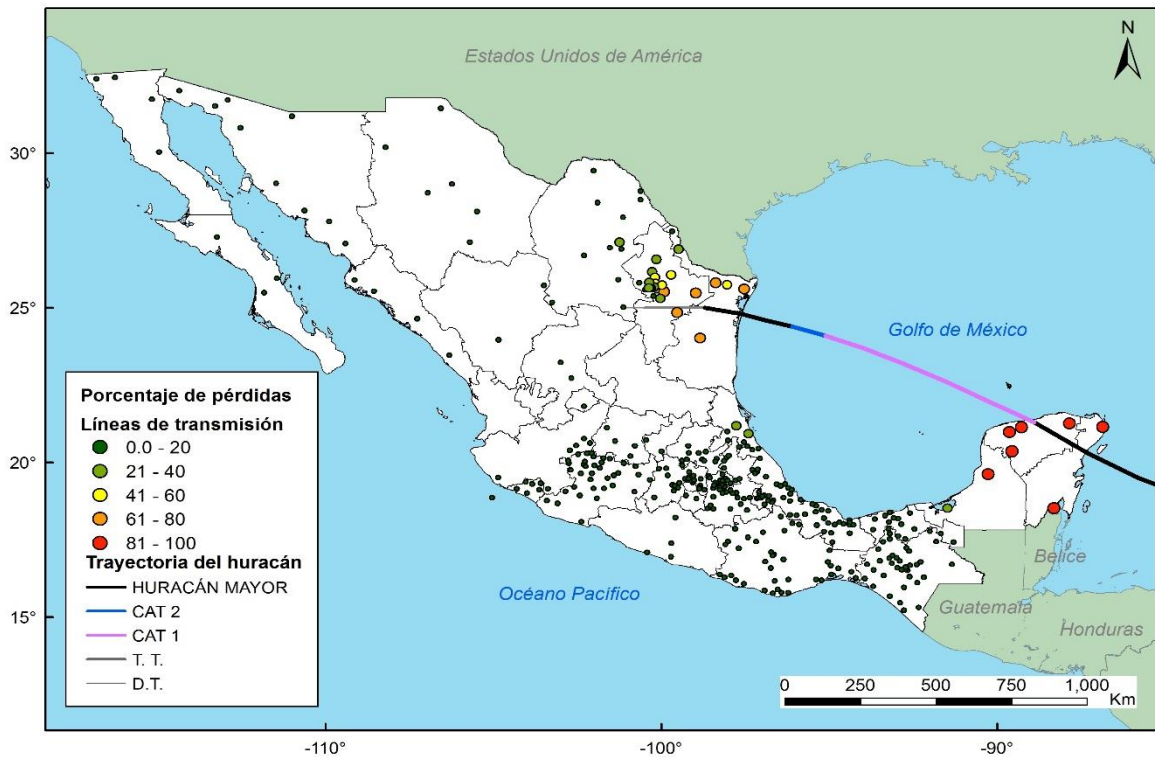


Figura 5. 5 Porcentaje de pérdidas. Huracán Emily.

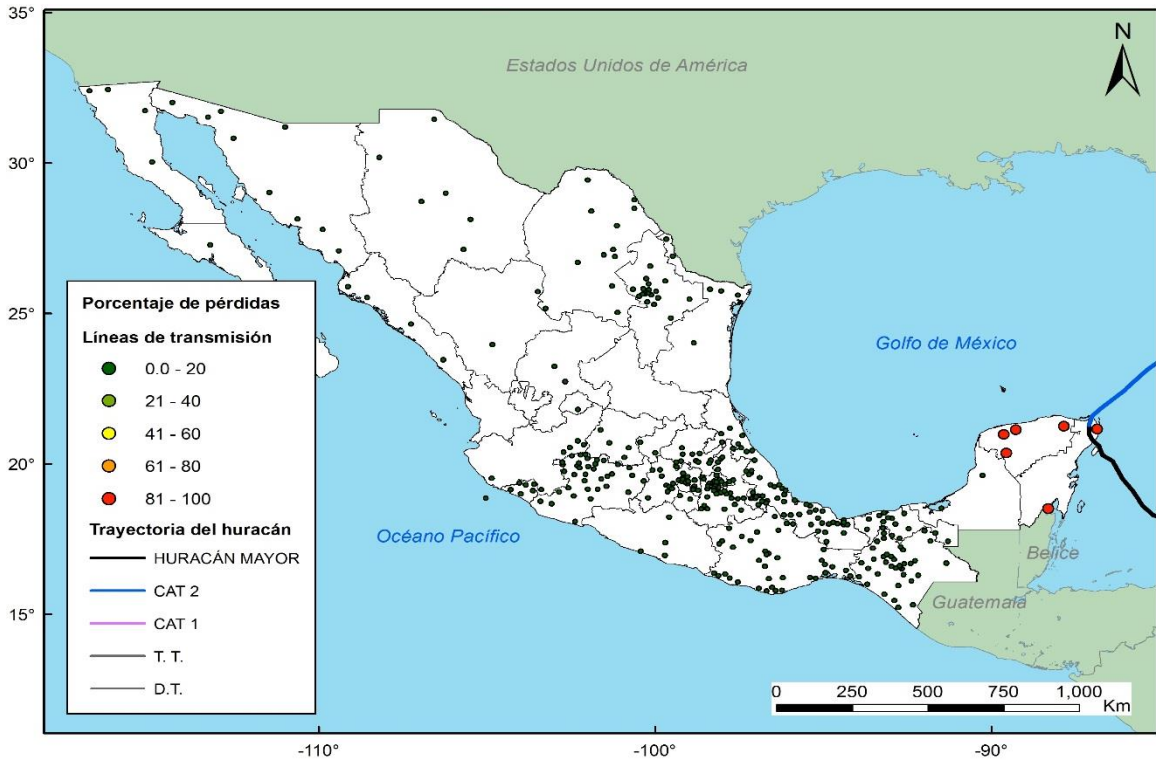


Figura 5. 6 Porcentaje de pérdidas. Huracán Wilma.

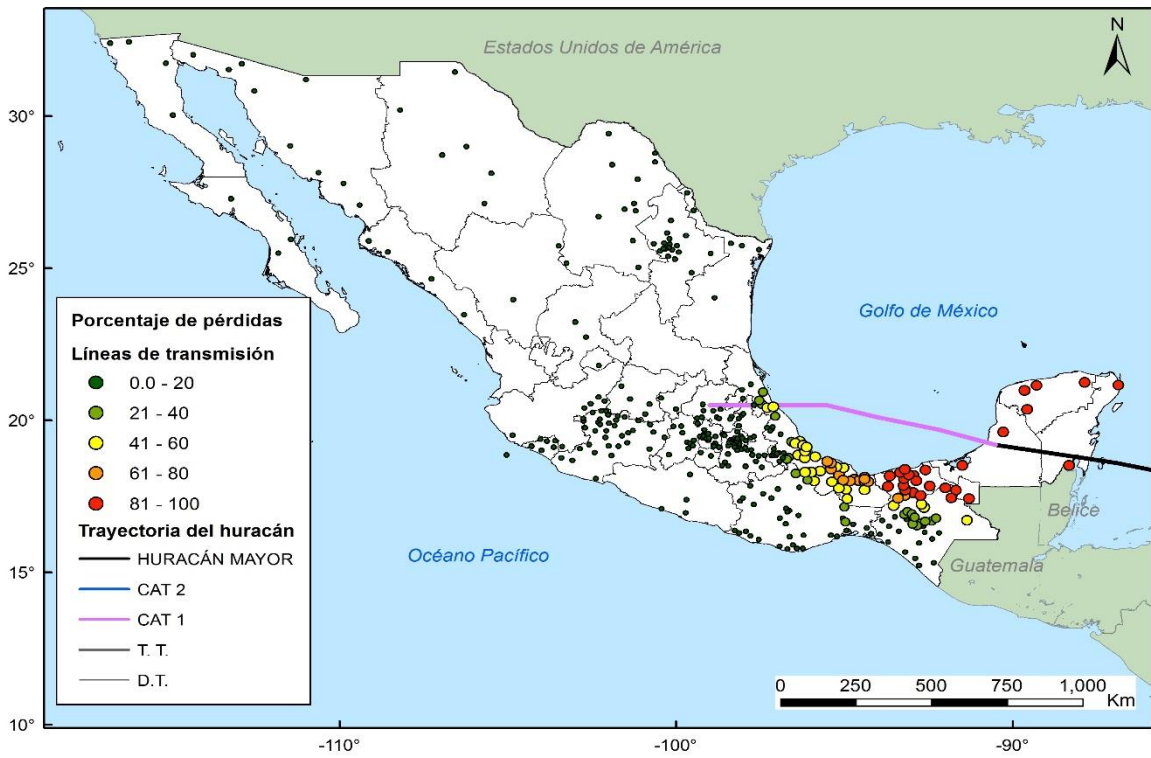


Figura 5. 7 Porcentaje de pérdidas. Huracán Dean.

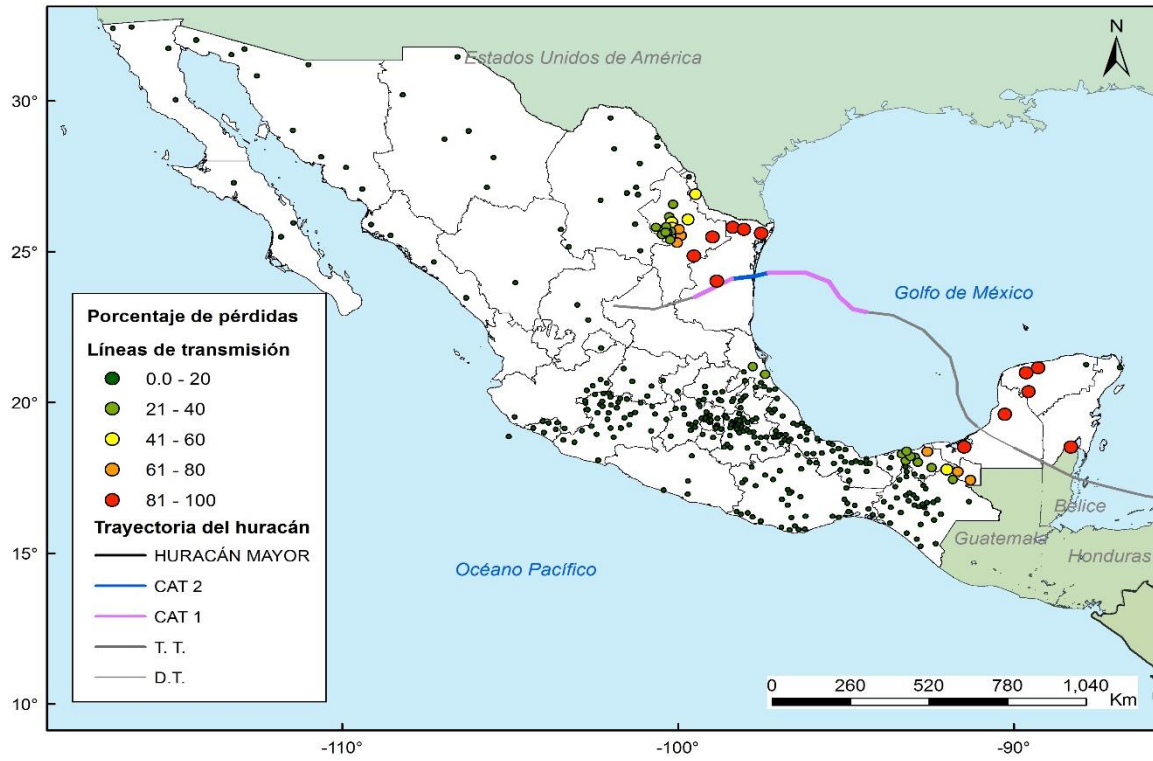


Figura 5. 8 Porcentaje de pérdidas. Huracán Alex.

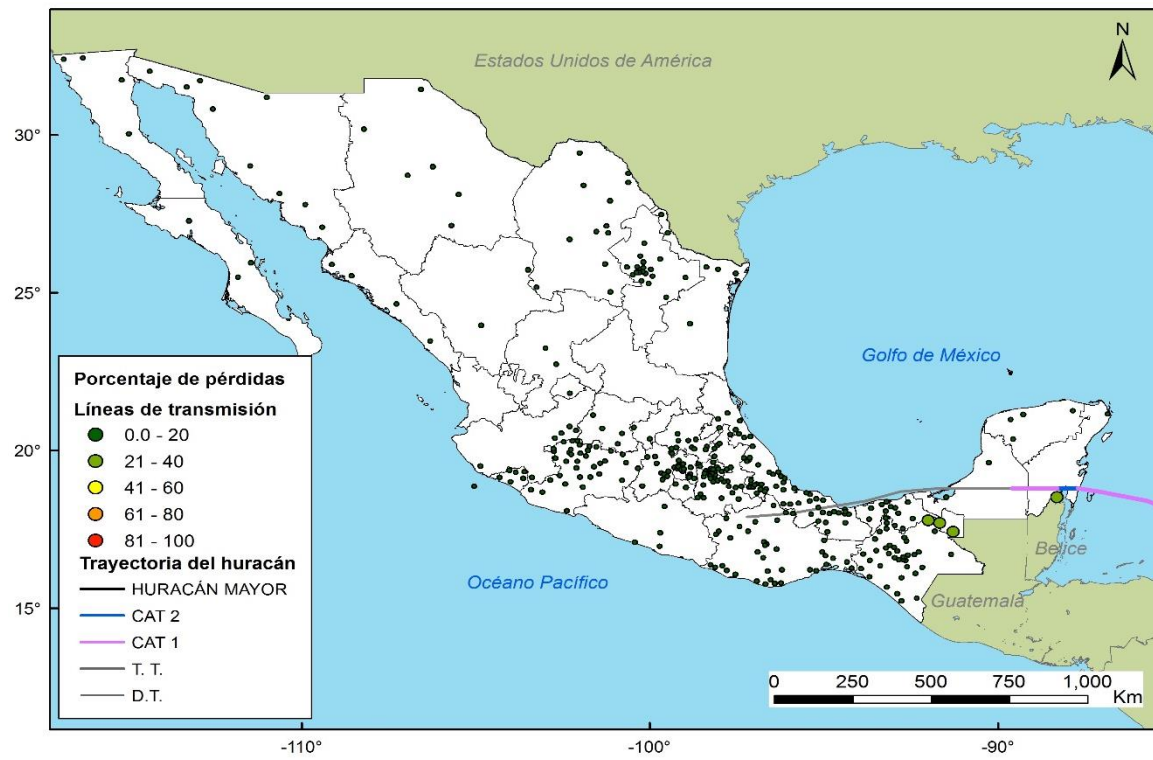


Figura 5. 9 Porcentaje de pérdidas. Huracán Ernesto.

5.4.2 Análisis probabilista

Los resultados obtenidos a partir del cálculo probabilista del riesgo, considerando los escenarios que representan la amenaza del país (Tabla A. 1), se representan en la Figura 5. 10. La pérdida corresponde a la Pérdida Anual Esperada.

Se expresan dos medidas de riesgo para los eventos seleccionados: la pérdida anual, y algunos escenarios utilizados en el análisis, se muestran en la

Tabla 5. 1 y la curva de Pérdida máxima probable se representa en la Figura 5. 11. Se presentan también, en la Tabla 5. 2, los escenarios críticos en función del daño esperado.

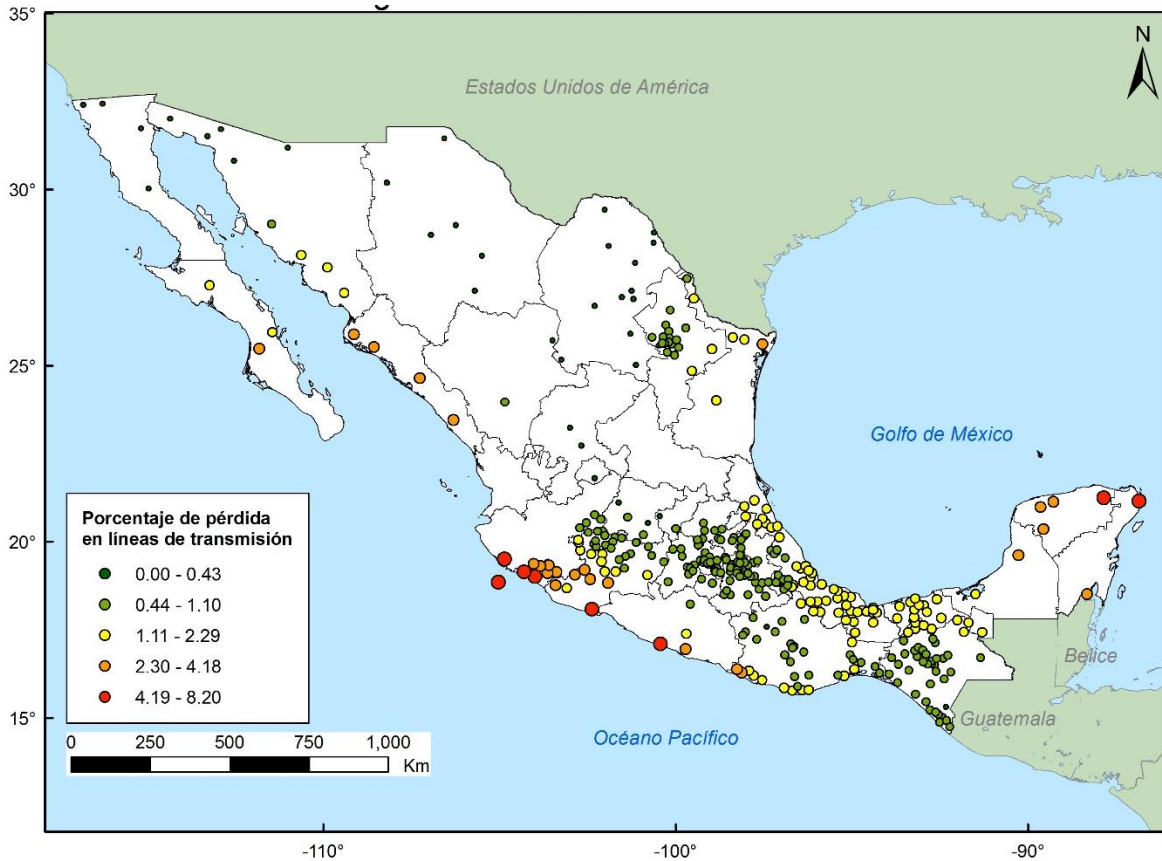


Figura 5. 10 Riesgo eólico en líneas de transmisión eléctrica

Tabla 5. 1 Pérdida anual esperada.

ORIGEN	ID	ESCENARIO	CAT.	PERDIDA ESPERADA	EXPOSICION	PERDIDA ANUAL
Océano Atlántico y/o Mar Caribe	1	25/08/1864	1	\$ 169,332.00	\$ 43,676,300.00	\$ 1,136.46
	2	05/09/1865	2	\$ 5,897,930.00	\$ 117,590,000.00	\$ 39,583.43
	94	Charlie	4	\$ 17,676,000.00	\$ 225,521,000.00	\$ 118,630.88
	100	Hilda	3	\$ 15,576,800.00	\$ 220,481,000.00	\$ 104,542.29
	101	Janet	5	\$ 20,638,100.00	\$ 209,562,000.00	\$ 138,510.75
	108	Inez	4	\$ 16,160,000.00	\$ 243,579,000.00	\$ 108,456.39
	130	Gilberto	5	\$ 17,836,500.00	\$ 256,598,000.00	\$ 119,708.06
	144	Isidore	3	\$ 9,610,950.00	\$ 73,073,800.00	\$ 64,503.03
	147	Emily	5	\$ 14,441,200.00	\$ 244,839,000.00	\$ 96,920.81
	148	Stan	1	\$ 2,275,310.00	\$ 200,743,000.00	\$ 15,270.54
	149	Wilma	5	\$ 5,868,720.00	\$ 40,316,600.00	\$ 39,387.39
	150	Dean	5	\$ 16,489,600.00	\$ 223,841,000.00	\$ 110,668.47
	154	Alex	2	\$ 8,248,940.00	\$ 246,099,000.00	\$ 55,362.02
	159	Ernesto	1	\$ 2,107,180.00	\$ 204,523,000.00	\$ 14,142.15
Océano Pacífico	160	9/9/1949	1	\$ 190,493.00	\$ 38,216,800.00	\$ 2,976.45
	176	22/10/1959	5	\$ 3,217,720.00	\$ 192,764,000.00	\$ 50,276.88
	187	Mona	1	\$ 797,351.00	\$ 49,135,800.00	\$ 12,458.61
	192	Olivia	3	\$ 2,611,230.00	\$ 45,356,100.00	\$ 40,800.47
	215	Liza	4	\$ 8,261,090.00	\$ 85,672,700.00	\$ 129,079.53
	270	Pauline	4	\$ 7,721,950.00	\$ 183,104,000.00	\$ 120,655.47
	276	Juliette	4	\$ 2,715,000.00	\$ 323,373,000.00	\$ 42,421.88
	277	Kenna	5	\$ 3,217,340.00	\$ 161,686,000.00	\$ 50,270.94
	278	Ignacio	2	\$ 1,908,840.00	\$ 79,793,200.00	\$ 29,825.63
	284	John	4	\$ 9,204,280.00	\$ 287,256,000.00	\$ 143,816.88
	285	Lane	3	\$ 5,075,450.00	\$ 133,969,000.00	\$ 79,303.91
	289	Norbert	4	\$ 7,239,530.00	\$ 243,579,000.00	\$ 113,117.66
	291	Jimena	5	\$ 5,368,330.00	\$ 139,428,000.00	\$ 83,880.16
	302	Paul	3	\$ 596,190.00	\$ 43,676,300.00	\$ 9,315.47
					TOTAL	\$ 5,816,674.16

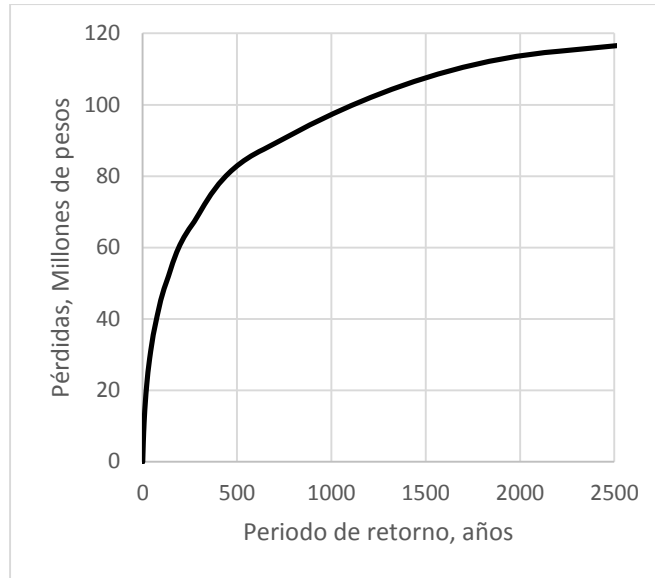


Figura 5. 11 Pérdida Máxima Probable

Tabla 5. 2 Escenarios críticos

ESCENARIO	CATEGORIA	FRECUENCIA	PÉRDIDA ESPERADA	PÉRDIDA ANUAL
John	4	1.56E-02	\$ 9,200,000.00	\$ 143,520.00
Janet	5	6.71E-03	\$ 20,600,000.00	\$ 138,226.00
Liza	4	1.56E-02	\$ 8,260,000.00	\$ 128,856.00
Paulina	4	1.56E-02	\$ 7,720,000.00	\$ 120,432.00
Gilberto	5	6.71E-03	\$ 17,800,000.00	\$ 119,438.00

5.4.3 Caso de estudio: línea de transmisión Xul-há – Chetumal

Se realizó el cálculo de riesgo probabilista considerando la línea de transmisión localizada entre las subestaciones eléctricas del poblado de Xul-há y la ciudad de Chetumal, con el fin de obtener resultados más precisos y observar las diferencias en el análisis entre considerar la línea de transmisión completa y agrupar las torres de transmisión en un solo punto.

En la Figura 5. 12 se representa la pérdida total como resultado de un análisis probabilista del riesgo, con los escenarios de la Tabla A. 1 considerando la línea de transmisión y distribuyendo las torres de transmisión a lo largo de la misma. En la Figura 5. 13 se muestra la pérdida que tendrían las torres de transmisión si se colocaran en un solo punto.

En la Tabla 5. 3 y en la Tabla 5. 4 se describe la pérdida anual obtenida analizando las torres considerándolas a lo largo de línea y en un solo punto, respectivamente.

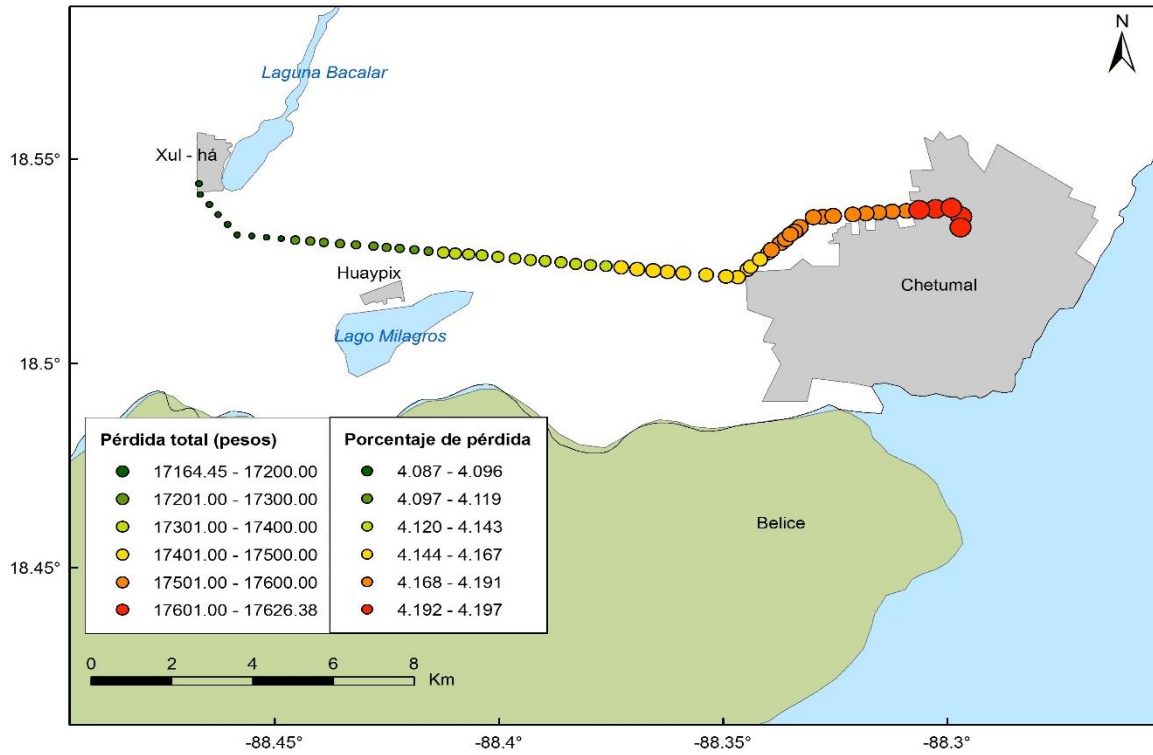


Figura 5. 12 Pérdida total en línea de transmisión tramo Xul-há - Chetumal.

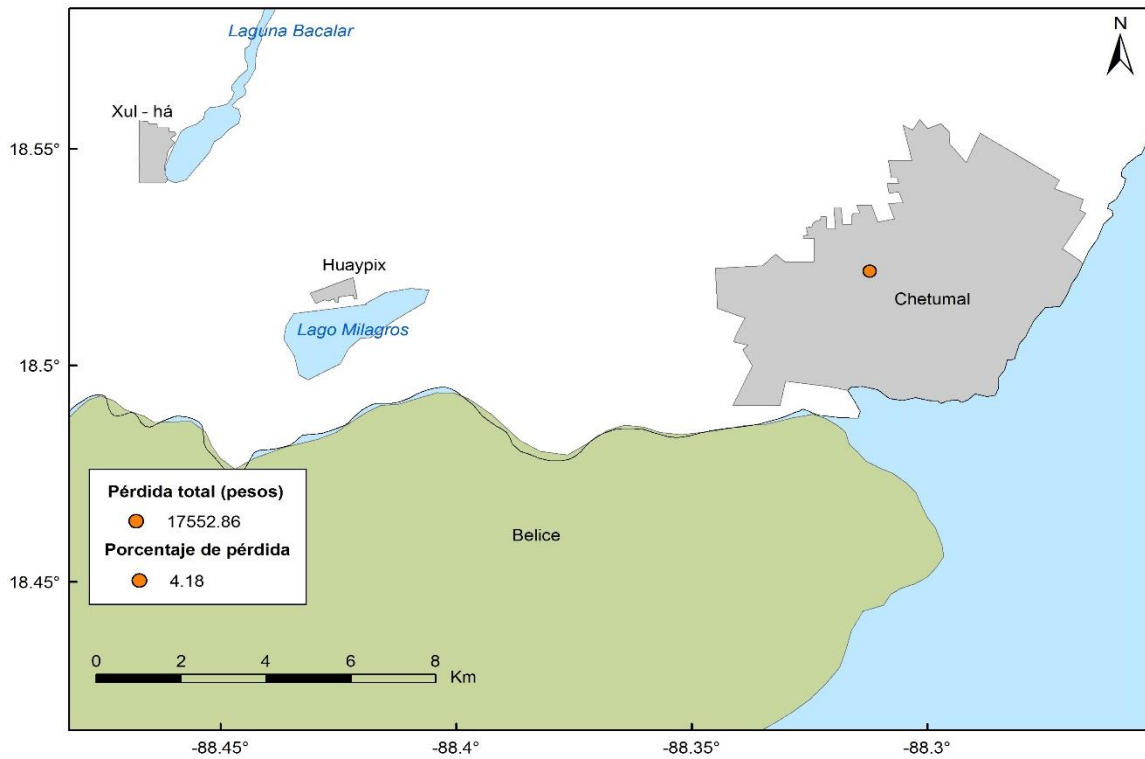


Figura 5. 13 Pérdida total en torres de transmisión en Chetumal

Tabla 5. 3 Pérdida anual considerando el tramo completo de la línea de transmisión.

ESCENARIO	CAT.	FRECUENCIA	PÉRDIDA ESPERADA	EXPOSICIÓN	PÉRDIDA ANUAL
Keith	4	6.71E-03	\$ 6,838,970.00	\$ 26,877,700.00	\$ 45,899.13
Carmen	4	6.71E-03	\$ 5,786,770.00	\$ 26,877,700.00	\$ 38,837.39
Janet	5	6.71E-03	\$ 4,592,500.00	\$ 26,877,700.00	\$ 30,822.15
Dean	5	6.71E-03	\$ 4,469,850.00	\$ 26,877,700.00	\$ 29,999.00
Wilma	5	6.71E-03	\$ 3,964,910.00	\$ 26,877,700.00	\$ 26,610.14
Isidore	3	6.71E-03	\$ 3,659,030.00	\$ 26,877,700.00	\$ 24,557.25
Emily	5	6.71E-03	\$ 2,997,190.00	\$ 26,877,700.00	\$ 20,115.37
Gilbert	5	6.71E-03	\$ 2,975,730.00	\$ 26,877,700.00	\$ 19,971.34
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
				TOTAL	\$ 1,113,609.61

Tabla 5. 4 Pérdida anual considerando la línea en un solo punto.

ESCENARIO	CAT.	FRECUENCIA	PÉRDIDA ESPERADA	EXPOSICIÓN	PÉRDIDA ANUAL
Keith	4	6.71E-03	\$ 6,898,993.16	\$ 26,877,700.00	\$ 46,301.97
Carmen	4	6.71E-03	\$ 5,837,558.38	\$ 26,877,700.00	\$ 39,178.25
Janet	5	6.71E-03	\$ 4,632,806.70	\$ 26,877,700.00	\$ 31,092.67
Dean	5	6.71E-03	\$ 4,509,080.25	\$ 26,877,700.00	\$ 30,262.29
Wilma	5	6.71E-03	\$ 3,999,708.58	\$ 26,877,700.00	\$ 26,843.68
Isidore	3	6.71E-03	\$ 3,691,143.98	\$ 26,877,700.00	\$ 24,772.78
Emily	5	6.71E-03	\$ 3,023,495.25	\$ 26,877,700.00	\$ 20,291.92
Gilbert	5	6.71E-03	\$ 3,001,846.90	\$ 26,877,700.00	\$ 20,146.63
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
				TOTAL	\$ 1,123,383.35

Se puede observar que las pérdidas considerando las torres en un punto son ligeramente mayores, en un 0.8%, sin embargo la importancia de esta diferencia reside en que se tiene una sobreestimación del riesgo en la cartera de bienes expuestos.

De igual manera es importante señalar que la distribución de las torres en la línea de transmisión y su ubicación geográfica influye en el resultado obtenido, ya que la velocidad del viento ocasionada por el paso de un huracán varía con la distancia al ojo y por efectos de la rugosidad del terreno.

Las pérdidas obtenidas con un único escenario son mayores que en el cálculo probabilista del riesgo debido a que en el primer caso se considera la ocurrencia de un solo evento con frecuencia igual a 1, situación que ocurre en la realidad, y en el segundo se consideran todos los eventos posibles y las pérdidas se pesan con las frecuencias de cada evento.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

En México se presentan velocidades de viento extremas debido al paso de huracanes, vaguadas e incluso tornados por el territorio nacional. Aunque el periodo de retorno de estos eventos meteorológicos es mayor al tiempo de vida útil de la línea de transmisión, la magnitud de las velocidades de viento a las que pueden estar sometidas supera a las velocidades de diseño especificadas en la especificación CFE J1000 – 50 (CFE, 2011 b).

Tan sólo en la ciudad de Chetumal en la temporada de huracanes del 2005 los huracanes Emily y Wilma ocasionaron velocidades de 184 y 280 km/h, respectivamente, superando dos veces en un año la velocidad de diseño para torres de transmisión eléctrica en esa ciudad, especificada en la norma CFE J1000 – 50 (CFE, 2011 b), correspondiente a la de un periodo de retorno de 10 y 50 años, 113 y 153 km/h respectivamente.

Por ello es indispensable definir un margen de daño aceptable y con ello una velocidad de diseño óptima que permita el funcionamiento de estructuras principales después de un evento natural de estas magnitudes.

De igual manera se debe considerar la diferencia entre los perfiles de velocidades de viento atmosférico y el perfil de viento causado por un huracán, una vaguada y un tornado, pues afectan de manera diferente las estructuras en función a su altura. Por ejemplo, durante el paso del ojo de un huracán, la velocidad mayor se presenta a una altura de 500 m, lo que simboliza un riesgo mayor en edificios altos o edificios localizados en un promontorio.

Las fallas en una torre para transmisión eléctrica se deben a muchos aspectos, pasando por alto aquéllos como: la corrosión de los elementos, falta de mantenimiento, falta o robo de piezas, y dando por hecho que las conexiones están adecuadamente detalladas y con elementos rigidizantes, se realizaron curvas de vulnerabilidad considerando las fallas estructurales más importantes: por capacidad de elementos y considerando los efectos del viento sobre los cables.

Se podrían tomar más mecanismos de falla, como el momento de volteo en la cimentación, por tipo de torre, efecto del empuje del colapso de una torre en la misma línea, entre otros, teniendo la información necesaria.

La curva de vulnerabilidad obtenida en esta tesis (Figura 4. 29) es aplicable para una porción de línea con las características mencionadas en la misma. Modificar el modelo de torre de transmisión, así como la rigidez de la misma, los materiales o claros entre torres, implican otro comportamiento estructural ante las cargas de viento.

El parámetro ρ aplicable a la ecuación general de daño por viento (Ec. 4. 54) para líneas de transmisión eléctrica se puede tomar igual a 10 y se puede determinar la velocidad del viento a la

cual ocurre el 50% de daño, \bar{V} , con la curva de capacidad como aquella a la cual ocurre la mitad del desplazamiento entre el correspondiente la primer falla y el valor anterior al colapso.

Se analizaron las fallas presentadas en el modelo estudiado, y fallas más comunes que presentan las torres de transmisión eléctrica debido a la amenaza eólica son:

1. Falla de diagonales debajo de la primera cruceta y en el cuerpo de la primera y última cruceta.
2. Falla de las vigas de la cruceta en la unión con la cadena de aisladores.
3. Fallan las piernas del cuerpo piramidal que se encuentran en los primeros 10 metros sobre el nivel del suelo.

Las fuerzas de viento que actúan en un ángulo de 45° sobre una torre de celosía son más desfavorables que a 0° o 90° debido a que el área expuesta aumenta de manera considerable y se presentan efectos de torsión sobre la estructura. Sin embargo, al considerar el efecto del viento en los cables la dirección de viento perpendicular a los mismos ocasiona fuerzas mayores que a 45°.

Las líneas de transmisión eléctrica ubicadas en la zona noreste de la península de Yucatán, en la costa de Jalisco, Colima, Michoacán y Guerrero presentan mayor riesgo eólico en función a la amenaza eólica ocasionada por vientos de huracán.

Las líneas de transmisión se representaron como puntos ubicados en las ciudades principales con el número de torres de transmisión de la línea. Sin embargo también se podría representar la línea de transmisión completa, como una sucesión de puntos, en la cual cada punto representa una torre de transmisión. La estimación de la pérdida considerando ambas representaciones es ligeramente diferente (0.8% para el caso de estudio), sin embargo la elección de la distribución de los bienes expuestos depende del grado de exactitud que se busque en el análisis de riesgo.

Los resultados de riesgo tienden a ser más precisos cuando se considera la línea de transmisión como un conjunto de puntos, pues las velocidades de viento ocasionadas por un huracán varían con la distancia al ojo y con la rugosidad del terreno, así mismo se puede considerar diferentes tipos de torres de transmisión y con ello, representar de una mejor manera el comportamiento de la línea completa.

RECOMENDACIONES

Es importante mantener la integridad estructural de las líneas de transmisión eléctrica y sus componentes, para ello, se pueden llevar a cabo acciones que disminuyan fallas estructurales como:

1. Elegir las trayectorias de las líneas de transmisión lo más retirado posible de las costas que es donde generalmente se registran velocidades de viento mayores debido a huracanes, con el propósito de buscar protección natural y mejores características del terreno de desplante de las cimentaciones.
2. Utilizar coeficientes de seguridad adecuados, que consideren las ráfagas presentadas en fenómenos de fuertes vientos.
3. Contemplar un reglamento de diseño que considere los efectos aeroelásticos del viento sobre cables y los efectos dinámicos y turbulentos del viento.

4. Diseñar y colocar elementos para torsión en la base de la estructura y cerramientos. Así como un patrón completamente triangular para elementos secundarios y diagonales que aseguren un completo arriostramiento a los elementos principales.
5. Evitar el uso de secciones tipo 4, ya que la norma no especifica el diseño con flujo plástico, por lo cual es preferente respetar anchos y peraltes mínimos.
6. Revisar efectos aeroelásticos en cables como galope y desprendimiento de vórtices y asegurar el amortiguamiento que permita disminuir dichos efectos en los cables.

Sería adecuado mencionar en la norma CFEJ1000-50 la relación de esbeltez aceptable para el comportamiento deseado en las torres de transmisión eléctrica, pues sólo especifica anchos y peraltes mínimos de secciones estructurales.

De igual manera podría recomendarse que el diseño considere la dirección de viento a 45°, o la dirección más desfavorable debida al área expuesta mayor y la dirección perpendicular a los cables, pues en ocasiones se omite un análisis con dichas apreciaciones.

APÉNDICES

APÉNDICE A.- ESCENARIOS QUE COMPONEN LA AMENAZA POR HURACÁN EN MÉXICO

En la Tabla A. 1 se describen los escenarios correspondientes a la amenaza por huracán en México, los cuales se componen por huracanes desde categoría 1 a categoría 5 que han impactado el país. Se tomaron los huracanes generados en el océano Atlántico y Mar Caribe desde 1864 hasta 2012 y en el océano Pacífico desde 1950 hasta 2012.

Tabla A. 1 Escenarios que componen la amenaza por huracán en México

ID	ESCENARIO	FECHA	CAT.	FRECUENCIA	ORIGEN
1	Sin nombre	25/08/1864	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
2	Sin nombre	05/09/1865	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
3	Sin nombre	12/08/1866	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
4	Sin nombre	01/10/1867	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
5	Sin nombre	04/10/1868	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
6	Sin nombre	29/10/1870	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
7	Sin nombre	29/09/1871	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
8	Sin nombre	17/09/1873	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
9	Sin nombre	25/09/1873	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
10	Sin nombre	24/09/1874	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
11	Sin nombre	13/09/1877	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
12	Sin nombre	20/09/1877	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
13	Sin nombre	07/08/1878	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
14	Sin nombre	18/08/1879	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
15	Sin nombre	23/10/1879	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
16	Sin nombre	03/08/1880	4	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
17	Sin nombre	04/10/1880	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
18	Sin nombre	15/08/1881	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
19	Sin nombre	16/09/1885	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
20	Sin nombre	13/06/1886	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
21	Sin nombre	16/06/1886	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
22	Sin nombre	14/07/1886	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
23	Sin nombre	15/09/1886	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
24	Sin nombre	19/07/1887	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
25	Sin nombre	11/09/1887	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe

Tabla A. 2 Escenarios que componen la amenaza por huracán en México (continuación).

ID	ESCENARIO	FECHA	CAT.	FRECUENCIA	ORIGEN
26	Sin nombre	30/08/1888	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
27	Sin nombre	11/09/1889	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
28	Sin nombre	04/10/1892	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
29	Sin nombre	12/06/1893	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
30	Sin nombre	04/07/1893	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
31	Sin nombre	04/09/1893	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
32	Sin nombre	27/09/1893	4	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
33	Sin nombre	30/09/1894	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
34	Sin nombre	21/08/1895	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
35	Sin nombre	22/09/1896	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
36	Sin nombre	06/10/1896	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
37	Sin nombre		1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
38	Sin nombre		1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
39	Sin nombre		2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
40	Sin nombre		3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
41	Sin nombre		3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
42	Sin nombre		2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
43	Sin nombre		3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
44	Sin nombre		2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
45	Sin nombre		2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
46	Sin nombre		2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
47	Sin nombre		4	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
48	Sin nombre		3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
49	Sin nombre	12/08/1916	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
50	Sin nombre	27/08/1916	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
51	Sin nombre	12/10/1916	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
52	Sin nombre	10/11/1916	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
53	Sin nombre	31/07/1918	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
54	Sin nombre	22/08/1918	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
55	Sin nombre	16/09/1920	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
56	Sin nombre	14/06/1921	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
57	Sin nombre	06/09/1921	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
58	Sin nombre	19/10/1921	4	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
59	Sin nombre	13/10/1922	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
60	Sin nombre	12/10/1923	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
61	Sin nombre	13/10/1924	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
62	Sin nombre	29/11/1925	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
63	Sin nombre	21/08/1926	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
64	Sin nombre	05/09/1931	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe

Tabla A. 3 Escenarios que componen la amenaza por huracán en México (continuación).

ID	ESCENARIO	FECHA	CAT.	FRECUENCIA	ORIGEN
65	Sin nombre	08/09/1931	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
66	Sin nombre	11/08/1932	4	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
67	Sin nombre	25/09/1932	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
68	Sin nombre	26/06/1933	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
69	Sin nombre	25/07/1933	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
70	Sin nombre	28/08/1933	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
71	Sin nombre	10/09/1933	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
72	Sin nombre	16/09/1933	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
73	Sin nombre	04/06/1934	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
74	Sin nombre	26/08/1934	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
75	Sin nombre	15/08/1936	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
76	Sin nombre	28/08/1936	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
77	Sin nombre	09/08/1938	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
78	Sin nombre	23/08/1938	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
79	Sin nombre	16/09/1941	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
80	Sin nombre	23/09/1941	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
81	Sin nombre	17/08/1942	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
82	Sin nombre	21/08/1942	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
83	Sin nombre	04/11/1942	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
84	Sin nombre	16/08/1944	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
85	Sin nombre	19/09/1944	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
86	Sin nombre	20/06/1945	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
87	Sin nombre	24/08/1945	4	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
88	Sin nombre	05/10/1946	4	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
89	Sin nombre	09/08/1947	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
90	Sin nombre	20/09/1949	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
91	Sin nombre	27/09/1949	4	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
92	Baker	20/08/1950	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
93	Item	08/10/1950	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
94	Charlie	12/08/1951	4	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
95	How	28/09/1951	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
96	Florence	23/09/1953	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
97	Alice	24/06/1954	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
98	Florence	11/09/1954	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
99	Gladys	04/09/1955	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
100	Hilda	10/09/1955	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
101	Janet	21/09/1955	5	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
102	Anna	25/07/1956	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe

Tabla A. 4 Escenarios que componen la amenaza por huracán en México (continuación).

ID	ESCENARIO	FECHA	CAT.	FRECUENCIA	ORIGEN
103	Flossy	21/09/1956	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
104	Abby	09/07/1960	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
105	Carla	03/09/1961	5	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
106	Hattie	27/10/1961	5	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
107	Isbell	08/10/1964	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
108	Inez	21/09/1966	4	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
109	Beulah	05/09/1967	5	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
110	Fern	01/10/1967	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
111	Abby	01/06/1968	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
112	Laurie	16/10/1969	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
113	Ella	08/09/1970	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
114	Edith	05/09/1971	5	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
115	Agnes	14/06/1972	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
116	Brenda	18/08/1973	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
117	Carmen	29/08/1974	4	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
118	Fifi	14/09/1974	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
119	Caroline	24/08/1975	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
120	Eloise	13/09/1975	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
121	Anita	29/08/1977	5	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
122	Greta	13/09/1978	4	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
123	Henri	14/09/1979	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
124	Allen	31/07/1980	5	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
125	Jeanne	07/11/1980	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
126	Alberto	02/06/1982	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
127	Barry	23/08/1983	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
128	Debby	31/08/1988	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
129	Florence	07/09/1988	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
130	Gilbert	08/09/1988	5	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
131	Keith	17/11/1988	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
132	Chantal	30/07/1989	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
133	Jerry	12/10/1989	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
134	Diana	03/08/1990	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
135	Gert	14/09/1993	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
136	Allison	02/06/1995	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
137	Opal	27/09/1995	4	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
138	Roxanne	07/10/1995	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
139	Dolly	19/08/1996	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
140	Mitch	21/10/1998	5	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
141	Bret	18/08/1999	4	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe

Tabla A. 5 Escenarios que componen la amenaza por huracán en México (continuación).

ID	ESCENARIO	FECHA	CAT.	FRECUENCIA	ORIGEN
142	Gordon	14/09/2000	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
143	Keith	28/09/2000	4	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
144	Isidore	14/09/2002	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
145	Claudette	06/07/2003	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
146	Erika	14/08/2003	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
147	Emily	10/07/2005	5	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
148	Stan	01/10/2005	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
149	Wilma	15/10/2005	5	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
150	Dean	13/08/2007	5	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
151	Lorenzo	25/09/2007	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
152	Dolly	20/07/2008	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
153	Ida	04/11/2009	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
154	Alex	25/06/2010	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
155	Karl	14/09/2010	3	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
156	Paula	11/10/2010	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
157	Richard	20/10/2010	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
158	Rina	23/10/2011	2	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
159	Ernesto	01/08/2012	1	6.71E-03	Océano Atlántico y/o Mar Caribe
160	Sin nombre	09/09/1949	1	1.56E-02	Océano Pacífico
161	Sin nombre	14/06/1950	1	1.56E-02	Océano Pacífico
162	Sin nombre	03/07/1950	1	1.56E-02	Océano Pacífico
163	Sin nombre	31/05/1951	1	1.56E-02	Océano Pacífico
164	Sin nombre	13/09/1953	1	1.56E-02	Océano Pacífico
165	Sin nombre	01/10/1953	1	1.56E-02	Océano Pacífico
166	Sin nombre	11/07/1954	1	1.56E-02	Océano Pacífico
167	Sin nombre	26/09/1954	1	1.56E-02	Océano Pacífico
168	Sin nombre	15/10/1955	1	1.56E-02	Océano Pacífico
169	Sin nombre	12/06/1956	1	1.56E-02	Océano Pacífico
170	Sin nombre	16/09/1957	1	1.56E-02	Océano Pacífico
171	Sin nombre	01/10/1957	1	1.56E-02	Océano Pacífico
172	Sin nombre	17/10/1957	1	1.56E-02	Océano Pacífico
173	Sin nombre	20/10/1957	4	1.56E-02	Océano Pacífico
174	Sin nombre	05/06/1958	1	1.56E-02	Océano Pacífico
175	Sin nombre	29/09/1958	1	1.56E-02	Océano Pacífico
176	Sin nombre	03/09/1959	1	1.56E-02	Océano Pacífico
177	Sin nombre	22/10/1959	5	1.56E-02	Océano Pacífico
178	Diana	16/08/1960	1	1.56E-02	Océano Pacífico

Tabla A. 6 Escenarios que componen la amenaza por huracán en México (continuación).

ID	ESCENARIO	FECHA	CAT.	FRECUENCIA	ORIGEN
179	Estelle	28/08/1960	1	1.56E-02	Océano Pacífico
180	Fernanda	02/09/1960	1	1.56E-02	Océano Pacífico
181	Hyacinth	21/10/1960	1	1.56E-02	Océano Pacífico
182	Iva	09/06/1961	1	1.56E-02	Océano Pacífico
183	Tara	09/11/1961	1	1.56E-02	Océano Pacífico
184	Valerie	23/06/1962	1	1.56E-02	Océano Pacífico
185	Doreen	30/09/1962	1	1.56E-02	Océano Pacífico
186	Emily	28/06/1963	1	1.56E-02	Océano Pacífico
187	Mona	17/10/1963	1	1.56E-02	Océano Pacífico
188	Emily	29/08/1965	1	1.56E-02	Océano Pacífico
189	Adele	19/06/1966	1	1.56E-02	Océano Pacífico
190	Helga	09/09/1966	1	1.56E-02	Océano Pacífico
191	Katrina	29/08/1967	1	1.56E-02	Océano Pacífico
192	Olivia	05/10/1967	1	1.56E-02	Océano Pacífico
193	Naomi	08/09/1968	1	1.56E-02	Océano Pacífico
194	Pauline	25/09/1968	1	1.56E-02	Océano Pacífico
195	Rebecca	05/10/1968	1	1.56E-02	Océano Pacífico
196	Glenda	07/09/1969	1	1.56E-02	Océano Pacífico
197	Jennifer	08/10/1969	1	1.56E-02	Océano Pacífico
198	Agatha	21/05/1971	2	1.56E-02	Océano Pacífico
199	Bridget	14/06/1971	2	1.56E-02	Océano Pacífico
200	Lily	27/08/1971	1	1.56E-02	Océano Pacífico
201	Nanette	02/09/1971	2	1.56E-02	Océano Pacífico
202	Olivia	19/09/1971	3	1.56E-02	Océano Pacífico
203	Priscilla	06/10/1971	3	1.56E-02	Océano Pacífico
204	Annette	31/05/1972	1	1.56E-02	Océano Pacífico
205	Hyacinth	27/08/1972	3	1.56E-02	Océano Pacífico
206	Joanne	29/09/1972	2	1.56E-02	Océano Pacífico
207	Florence	24/07/1973	1	1.56E-02	Océano Pacífico
208	Irah	21/09/1973	2	1.56E-02	Océano Pacífico
209	Dolores	14/06/1974	1	1.56E-02	Océano Pacífico
210	Norma	09/09/1974	1	1.56E-02	Océano Pacífico
211	Orlene	20/09/1974	1	1.56E-02	Océano Pacífico
212	Agatha	01/06/1975	1	1.56E-02	Océano Pacífico
213	Olivia	21/10/1975	3	1.56E-02	Océano Pacífico
214	Kathleen	07/09/1976	1	1.56E-02	Océano Pacífico
215	Liza	25/09/1976	4	1.56E-02	Océano Pacífico
216	Madeline	28/09/1976	4	1.56E-02	Océano Pacífico
217	Doreen	12/08/1977	1	1.56E-02	Océano Pacífico

Tabla A. 7 Escenarios que componen la amenaza por huracán en México (continuación).

ID	ESCENARIO	FECHA	CAT.	FRECUENCIA	ORIGEN
218	Heather	03/10/1977	1	1.56E-02	Océano Pacífico
219	Aletta	30/05/1978	1	1.56E-02	Océano Pacífico
220	Norman	30/08/1978	4	1.56E-02	Océano Pacífico
221	Olivia	19/09/1978	1	1.56E-02	Océano Pacífico
222	Rosa	02/10/1978	1	1.56E-02	Océano Pacífico
223	Andres	31/05/1979	2	1.56E-02	Océano Pacífico
224	Guillermo	08/09/1979	1	1.56E-02	Océano Pacífico
225	Ignacio	23/10/1979	4	1.56E-02	Océano Pacífico
226	Norma	08/10/1981	3	1.56E-02	Océano Pacífico
227	Otis	23/10/1981	1	1.56E-02	Océano Pacífico
228	Paul	18/09/1982	2	1.56E-02	Océano Pacífico
229	Adolph	20/05/1983	2	1.56E-02	Océano Pacífico
230	Lorena	06/09/1983	3	1.56E-02	Océano Pacífico
231	Tico	11/10/1983	4	1.56E-02	Océano Pacífico
232	Winnie	04/12/1983	1	1.56E-02	Océano Pacífico
233	Fausto	03/07/1984	2	1.56E-02	Océano Pacífico
234	Genevieve	07/07/1984	3	1.56E-02	Océano Pacífico
235	Iselle	03/08/1984	4	1.56E-02	Océano Pacífico
236	Marie	05/09/1984	1	1.56E-02	Océano Pacífico
237	Norbert	14/09/1984	4	1.56E-02	Océano Pacífico
238	Odile	17/09/1984	2	1.56E-02	Océano Pacífico
239	Polo	25/09/1984	3	1.56E-02	Océano Pacífico
240	Waldo	06/10/1985	2	1.56E-02	Océano Pacífico
241	Agatha	21/05/1986	1	1.56E-02	Océano Pacífico
242	Newton	18/09/1986	1	1.56E-02	Océano Pacífico
243	Paine	27/09/1986	2	1.56E-02	Océano Pacífico
244	Roslyn	15/10/1986	4	1.56E-02	Océano Pacífico
245	Eugene	21/07/1987	2	1.56E-02	Océano Pacífico
246	Norma	14/09/1987	1	1.56E-02	Océano Pacífico
247	Cosme	17/06/1989	1	1.56E-02	Océano Pacífico
248	Kiko	25/08/1989	3	1.56E-02	Océano Pacífico
249	Raymond	24/09/1989	4	1.56E-02	Océano Pacífico
250	Lowell	23/08/1990	1	1.56E-02	Océano Pacífico
251	Delores	22/06/1991	1	1.56E-02	Océano Pacífico
252	Nora	06/11/1991	2	1.56E-02	Océano Pacífico
253	Lester	19/08/1992	1	1.56E-02	Océano Pacífico
254	Virgil	01/10/1992	4	1.56E-02	Océano Pacífico

Tabla A. 8 Escenarios que componen la amenaza por huracán en México (continuación).

ID	ESCENARIO	FECHA	CAT.	FRECUENCIA	ORIGEN
255	Winifred	06/10/1992	3	1.56E-02	Océano Pacífico
256	Calvin	04/07/1993	2	1.56E-02	Océano Pacífico
257	Hilary	17/08/1993	3	1.56E-02	Océano Pacífico
258	Lidia	08/09/1993	4	1.56E-02	Océano Pacífico
259	Ileana	10/08/1994	1	1.56E-02	Océano Pacífico
260	Rosa	08/10/1994	2	1.56E-02	Océano Pacífico
261	Flossie	07/08/1995	1	1.56E-02	Océano Pacífico
262	Henriette	31/08/1995	2	1.56E-02	Océano Pacífico
263	Ismael	12/09/1995	1	1.56E-02	Océano Pacífico
264	Alma	19/06/1996	2	1.56E-02	Océano Pacífico
265	Boris	26/06/1996	1	1.56E-02	Océano Pacífico
266	Douglas	28/07/1996	4	1.56E-02	Océano Pacífico
267	Fausto	09/09/1996	3	1.56E-02	Océano Pacífico
268	Hernan	30/09/1996	1	1.56E-02	Océano Pacífico
269	Nora	16/09/1997	4	1.56E-02	Océano Pacífico
270	Pauline	05/10/1997	4	1.56E-02	Océano Pacífico
271	Rick	06/11/1997	2	1.56E-02	Océano Pacífico
272	Isis	31/08/1998	1	1.56E-02	Océano Pacífico
273	Lester	14/10/1998	3	1.56E-02	Océano Pacífico
274	Madeline	15/10/1998	1	1.56E-02	Océano Pacífico
275	Greg	05/09/1999	1	1.56E-02	Océano Pacífico
276	Juliette	21/09/2001	4	1.56E-02	Océano Pacífico
277	Kenna	21/10/2002	5	1.56E-02	Océano Pacífico
278	Ignacio	22/08/2003	2	1.56E-02	Océano Pacífico
279	Marty	18/09/2003	2	1.56E-02	Océano Pacífico
280	Nora	01/10/2003	2	1.56E-02	Océano Pacífico
281	Olaf	03/10/2003	1	1.56E-02	Océano Pacífico
282	Javier	10/09/2004	4	1.56E-02	Océano Pacífico
283	Otis	28/09/2005	2	1.56E-02	Océano Pacífico
284	John	27/08/2006	4	1.56E-02	Océano Pacífico
285	Lane	13/09/2006	3	1.56E-02	Océano Pacífico
286	Paul	21/10/2006	2	1.56E-02	Océano Pacífico
287	Henriette	30/08/2007	1	1.56E-02	Océano Pacífico
288	Ivo	18/09/2007	1	1.56E-02	Océano Pacífico
289	Norbert	03/10/2008	4	1.56E-02	Océano Pacífico
290	Andres	21/06/2009	1	1.56E-02	Océano Pacífico
291	Jimena	28/08/2009	5	1.56E-02	Océano Pacífico
292	Rick	15/10/2009	5	1.56E-02	Océano Pacífico

Tabla A. 9 Escenarios que componen la amenaza por huracán en México (continuación).

ID	ESCENARIO	FECHA	CAT.	FRECUENCIA	ORIGEN
293	Darby	22/06/2010	3	1.56E-02	Océano Pacífico
294	Frank	21/08/2010	1	1.56E-02	Océano Pacífico
295	Beatriz	18/06/2011	1	1.56E-02	Océano Pacífico
296	Dora	17/07/2011	5	1.56E-02	Océano Pacífico
297	Hilary	21/09/2011	4	1.56E-02	Océano Pacífico
298	Jova	05/10/2011	3	1.56E-02	Océano Pacífico
299	Irwin	04/10/2011	2	1.56E-02	Océano Pacífico
300	Bud	20/05/2012	3	1.56E-02	Océano Pacífico
301	Carlotta	13/06/2012	2	1.56E-02	Océano Pacífico
302	Paul	13/10/2012	3	1.56E-02	Océano Pacífico

APÉNDICE B.- CÁLCULO DE EFECTOS AEROELÁSTICOS EN CABLES

Como se ha mencionado en el capítulo 4 de este trabajo, los cables de las líneas de transmisión son susceptibles a las fluctuaciones del flujo del viento, generando fenómenos aeroelásticos como el desprendimiento de vórtices y galope, así como vibraciones eólicas y oscilaciones en subclaros, siendo los dos primeros los efectos de mayor impacto en estas estructuras.

Se efectuó la revisión de los mencionados efectos aeroelásticos en los cables de la línea de transmisión seleccionada con base en las ecuaciones Ec. 4. 8 a Ec. 4. 14. En la Tabla B. 1 se muestran los datos de los cables utilizados en el cálculo.

Tabla B. 1 Datos utilizados para calcular los efectos aeroelásticos en cables.

DATOS				
Número de Strouhal	St	0.2		
Dimensión característica	b	0.0095	m	Guarda
		0.032	m	Conductor
Longitud	L	400	m	
Masa por unidad de longitud	m	0.406	kg/m	Guarda
		1.87	kg/m	Conductor
Tensión en los cables	T	4900	kgf	Guarda
		14030	kgf	Conductor
Amortiguamiento de los aisladores	ζ	0.02		
Densidad promedio del aire	ρ	1.23	kg/m ³	

B.1 Cálculo de la frecuencia de los cables

Se obtiene la frecuencia de vibración para el primer modo en los cables sin tomar en cuenta el efecto de la catenaria ni la rigidez a flexión como se expresa en la Ec. B. 1 y los resultados obtenidos en la Tabla B. 2.

$$f_n = \frac{n}{2L} v \quad \text{Ec. B. 1}$$

En donde

f_n = Frecuencia natural del n modo de vibración, Hz.

$$v = \sqrt{\frac{T}{m}}$$

Tabla B. 2 Frecuencias naturales de los cables conductor y de guarda

	TENSIÓN (kgf m/s ²)	MASA (kg)	v	f_n (Hz)	ω_n rad/s
Guarda	48069	0.406	344.088	0.86	5.404
Conductor	137634.3	1.87	271.295	0.68	4.261

B.2 Desprendimiento de vórtices

Se obtuvo la velocidad de desprendimiento de vórtices considerando que la frecuencia natural del primer modo coincide con la frecuencia de desprendimiento de vórtices, f_s , y con ello comparar la velocidad crítica a la cual se presentan los vórtices.

Sustituyendo en la Ec. 4. 8 se calcularon las velocidades de desprendimiento para la primera, segunda y tercera frecuencia. Los resultados expresados en la Tabla B. 3 nos indican que la velocidad de desprendimiento de vórtices es tan pequeña que este fenómeno se presenta constantemente.

A pesar de ello, el cálculo del número de Reynolds como la Ec. 4. 9, nos indica que el flujo del viento en los cables se encuentra en el régimen subcrítico ($Re < 2 \times 10^5$) y los vórtices que se desprenden tienden a ser simétricos (Figura B. 1).

Tabla B. 3 Velocidad de desprendimiento de vórtices en cables de guarda y conductores

Frecuencia	CABLE DE GUARDA			CABLE CONDUCTOR		
	VELOCIDAD DE DESPRENDIMIENTO m/s	VELOCIDAD DE DESPRENDIMIENTO km/h	NÚMERO DE REYNOLDS Re	VELOCIDAD DE DESPRENDIMIENTO m/s	VELOCIDAD DE DESPRENDIMIENTO km/h	NÚMERO DE REYNOLDS Re
1	0.04	0.15	25.88	0.11	0.39	231.51
2	0.08	0.29	51.76	0.22	0.78	463.01
3	0.12	0.44	77.63	0.33	1.17	694.52

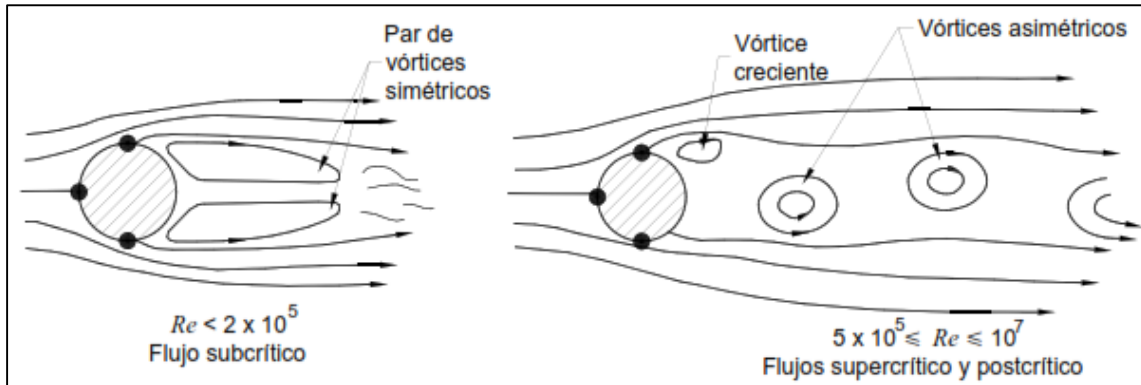


Figura B. 1 Flujo a través de un cilindro (CFE, 2008).

B.3 Galope

El galope se presenta en cables cuando no tienen secciones transversales no circulares, como en forma de D, como las que se forman cuando los cables están cubiertos de hielo. Se produce con elevadas velocidades de viento (mayores a 15 m/s) al acoplarse entre las fuerzas de sustentación y de resistencia cuando la estructura se encuentra oscilando en una dirección perpendicular a la corriente incidente.

Hasta la fecha, no se han reportado nevadas en las zonas del país con mayor peligro eólico, sin embargo la presencia de gotas de lluvia durante un evento atmosférico de grandes velocidades de viento puede modificar la sección circular del cable. A pesar de ello, esta situación aún no se contempla en los reglamentos de diseño mexicanos.

Utilizando el criterio de Glauert – Den Hartong, expresado en la ecuación Ec. 4. 13 y Ec. 4. 14, y la Figura B. 2 se obtuvieron las direcciones de viento para las cuales se presenta el galope en cables con una capa de hielo (Tabla B. 4).

Esto nos indica que para cables que tienen una capa de hielo con una excentricidad de 3/2, con las características mencionadas en la Tabla B. 1 y Tabla B. 3, se inicia el efecto de galope en cables cuando esta capa de hielo se encuentra a 180° de la dirección del viento a una velocidad de 25 km/h, y a velocidades mayores a 80 km/h se presenta la inestabilidad cuando la capa de hielo se encuentra entre 45° y 50° respecto a la dirección del viento.

Tabla B. 4 Ángulo de inestabilidad en cables debida al galope

VELOCIDAD DEL VIENTO km/h	ÁNGULO DE ATAQUE	
	CABLE DE GUARDA	CABLE CONDUCTOR
0	Sin galope	Sin galope
25	180	Sin galope
30	180	180
80	180, -45, -50	180
90 en adelante	180, -45, -50	180, -45, -50

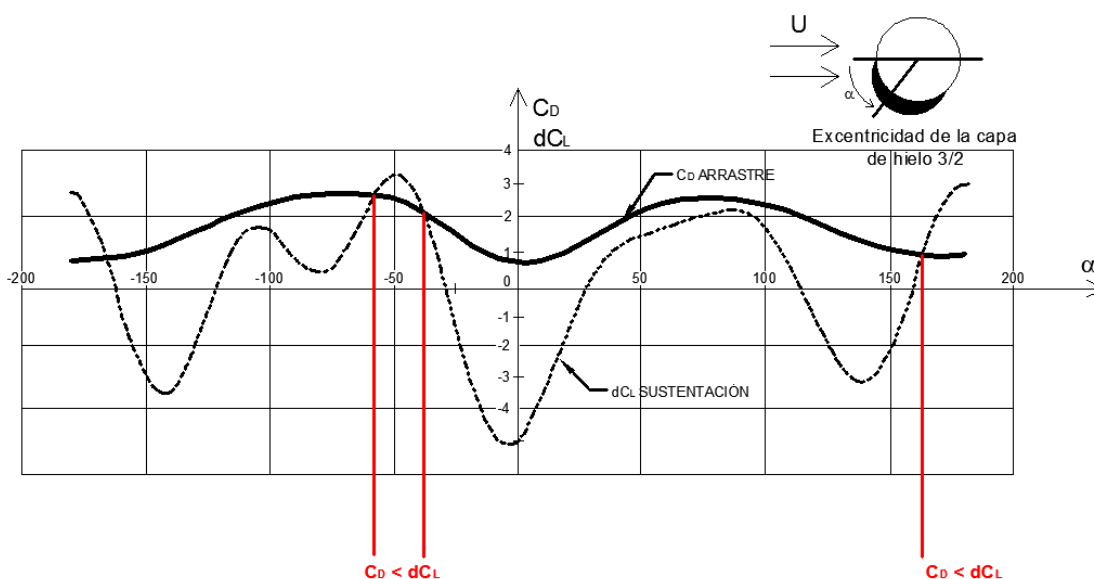


Figura B. 2 Coeficientes de arrastre y sustentación para cables con una capa de hielo

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aboshosha H. y El Damatty A. (2013). *Downburst Induced Forces on the Conductors of Electric Transmission Lines and the Corresponding Vulnerability of Towers Failure*. CSCE 2013 (Canadian Society for Civil Engineering Conference). Montreal, QC, Canadá.

Albermani F.G.A. y Kitipornchai S. (2003). *Numerical simulation of structural behavior of transmission towers*. Thin-Walled Structures, Vol. 41, núm. 2-3, pp 167-177.

Albermani F.G.A., Kitipornchai S. y Chan R.W.K. (2008). *Failure analysis of transmission towers*. Engineering Failure Analysis. Vol. 16, núm. 6, pp. 1922 – 1928

Ammar A., Craig A. y Mark E. (2010). *Collapse and Pull-Down Analysis of High Voltage Electricity Transmission Towers Subjected to Cyclonic Wind*. Risk and Impact Analysis Group, Geospatial and Earth Monitoring Division, Geoscience Australia. Canberra, Australia.

Avelar C. (2006). *Expresiones para modificar el intervalo de promediación en la velocidad de viento, entre los resultados de un modelo paramétrico y los boletines de huracanes*. Reporte Interno, ERN Ingenieros Consultores. Distrito Federal, México.

Bahena A. (1996). *Análisis no lineal de torres de transmisión*. Tesis de maestría. UNAM.

Centro Nacional de Prevención a Desastres (CENAPRED). (2013). *Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana. Vol. 1-11*. Ciudad de México.

Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2008). *Manual de diseño de obras civiles. Diseño por viento*. Distrito Federal, México.

Comisión Federal de Electricidad (2013 – 2014). *Boletín de prensa*. www.saladeprensa.cfe.gob.mx. Accesado septiembre 2013.

Comisión Federal de Electricidad. (2011 a). *División de distribución. Información sobre líneas de transmisión*.

Comisión Federal de Electricidad. (2011 b). *Especificación CFE J1000 – 50. Torres para líneas de transmisión y subtransmisión*. México.

Computers and Structures, Inc (CSI). (2013). *SAP2000 v.16*. Programa de cálculo de estructuras por elementos finitos. Estados Unidos.

Doswell C.A. y Burgess D. (1993). *Tornadoes and Tornadic Storms: A Review of Conceptual Models*. The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards. Geophysical Monograph 79, American Geophysical Union, pp. 161-172.

El Universal (2014). *Aeropuerto de San José del Cabo reanuda operación el viernes*. El Universal.mx Cartera. 2 de octubre de 2014. <http://www.eluniversal.com.mx/finanzas-cartera/2014/aeropuerto-los-cabos-1043022.html>. Accesado octubre 2014.

Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2010). *ArcGis v10*. Conjunto de aplicaciones para captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica.

ERN-LA (Consortio Evaluación de Riesgos Naturales América Latina). (2011). *Informe Técnico ERN-CAPRA-Tomo 1: Metodología de modelación probabilista de riesgos naturales*. Vol. 1 – 7.

ERN-LA e ITEC Ltda. (2011). *CAPRA-GIS v2.0*. Sistema de información geográfica para el cálculo del riesgo por amenazas naturales. Bogotá, Colombia.

ERN-LA y ERN Ingenieros Consultores S.C. (2009). *ERN-Huracán v1.0*. Sistema de modelación probabilista de amenaza por huracán. Distrito Federal, México.

Franklin J.L., Black M.L. y Valde C. (Abril 2000). *Eyewall Wind Profiles in Hurricanes Determined By GPS Dropwindsondes*. National Hurricane Center. www.nhc.noaa.gov. Accesado septiembre 2013.

Gaceta Electrónica UNAM. (Diciembre 2012). *Efectos dinámicos que se producen en las torres de soporte de líneas de transmisión de energía debido a la ruptura de un cable*. Accesado marzo 2014.

García J.S. (2006). *Comparación del diseño probabilista de torres de transmisión, con su diseño con base en seguridad*. Tesis de maestría. UNAM.

Holmes J.D. (2001). *Wind Loading of Structures*. Taylor & Francis Group. Londres.

Instituto de Ingeniería. (Diciembre 2010). *Amenaza por viento y marea de tormenta*. UNAM.

Li C.Q. (1998). *Risk assessment of transmission line structures under severe thunderstorms*. Structural Engineering. and Mechanics. Vol. 6, núm. 7, pp. 773-784.

López A., De León D., Vilar J.I. y Cordero C. (2008). *Vulnerabilidad de estructuras mayores de subestaciones eléctricas y de líneas de transmisión ante riesgos naturales de viento y sismo*. XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Veracruz, Veracruz.

López A., Corona J.C., Pérez L.E., et al. (2010). *Caracterización de la resistencia de estructuras de celosía mediante simulaciones de Monte Carlo para el análisis de vulnerabilidad ante peligros por viento y sismo*. XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. León, Guanajuato.

Macías J.M. y Avendaño A. (2013). *Climatología de tornados en México*. Investigaciones geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. ISSN 0188-4611, núm. 83, pp. 74 -87. UNAM.

Meseguer J., Sanz A., Perales J.M. y Pindado S. (2001). *Aerodinámica Civil. Cargas de viento en las edificaciones*. Mc. Graw Hill. Madrid, España.

Microsoft Corporation. (2012). *Microsoft Office Excel 2013*. Hoja de cálculo.

Morales R. (2008). *Efectos dinámicos generados en torres de transmisión por ruptura de cables*. Tesis de maestría. UNAM.

NASA (2012). *¿Cómo se forman los huracanes?*.
<http://spaceplace.nasa.gov/hurricanes/sp/>. Accesado octubre 2013.

National Hurricane Center. (2013). *Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale*.
<http://www.nhc.noaa.gov/aboutsshws.php>. Accesado octubre 2013.

National Weather Service (2004). *A Recommendation for an Enhanced Fujita Scale*. Wind Science and Engineering Center. Texas Tech University.

National Weather Service. (2008). *Beaufort Wind Scale*.
<http://www.srh.noaa.gov/mfl/?n=beaufort>. Accesado octubre 2013.

National Weather Service. (2009). *Downburst*.
<http://www.erh.noaa.gov/cae/svrwx/downburst.htm>. Accesado octubre 2013.

National Weather Service. (2010). *Tropical Cyclone Structure*.
http://www.srh.noaa.gov/jetstream/tropics/tc_structure.htm. Accesado octubre 2013.

Pang W., Chen Z., Liu F., Holmes R. (2012). *Failure risk of 230 kV Electricity Transmission Lines in South Carolina under Hurricane Wind Hazard*. ATC & SEI Conference on Advances in Hurricane Engineering. pp. 840-850. Miami, Florida.

Prasad Rao N., Knight G.M.S., Lakshmanan N. e Iyer N.R. (2010). *Investigation of transmission line tower failures*. Engineering Failure Analysis. Vol. 17, núm. 5, pp 1127-1141. Chennai, India.

Runestone Electric Association. (Septiembre 2011). *Storm damages vital transmission line*. REA Newslines. Alexandria, Minnesota.

Sánchez-Sesma J., Aguirre J.E. y Sen M. (1988). *Simple Modeling Procedure for Estimation of Cyclonic Wind Speeds*. *Journal of Structural Engineering*. ASCE. Vol. 144, núm. 2, pp. 353-370.

Savory E., Parke G.A.R., Zeinoddini M., Toy N. y Disney P. (2000). *Modelling of tornado and microburst-induced wind loading and failure of a lattice transmission tower*. Department of Civil Engineering, University of Surrey, Guildford, UK.

Secretaría de Marina. (2012). *Teoría sobre la formación de ciclones tropicales*. <http://meteorologia.semar.gob.mx/>. Accesado octubre 2013.

Silva R., Govaere G., Salles P., et al. (2002). *Oceanographic Vulnerability to Hurricanes on the Mexican Coast*. International Conference on Coastal Engineering. ASCE. Cardiff, Wales.

Sordo-Zabay E., Tapia E. y García D. (2006). *Comportamiento de torres de transmisión de alta tensión sujetas a la acción de vientos huracanados*. XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Puerto Vallarta, Jalisco.

Tapia E. y Sordo-Zabay E. (2012). *Patrones de carga reglamentarios para torres de transmisión de alta tensión sujetas a viento intenso*. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 12, núm. 2, pp. 219.

World Bank. (2013). *Building Resilience Integrating Climate and Disaster Risk into Development*. Washington DC, USA.

Zhang Z., Li H., Li G., Wang W. y Tian L. (2013). *The Numerical Analysis of Transmission Tower-Line System Wind-Induced Collapsed Performance*. Mathematical Problems. in Engineering. Article ID 413275.