



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño de torres de telecomunicaciones
frente a la acción del viento, mediante
el análisis de los desplazamientos y la
estimación del daño generalizado**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Civil

P R E S E N T A

Catalina Andrea Luna Andonegui

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Roberto Gómez Martínez

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| Índice de Figuras | III |
| Índice de Tablas | IV |
| Nomenclatura | V |
| Introducción | 1 |
| Capítulo 1 Antecedentes | 2 |
| 1.1 Objetivos | 2 |
| 1.1.1 Objetivo general | 2 |
| 1.1.2 Objetivos específicos | 2 |
| 1.2 Alcances | 2 |
| 1.3 Justificación | 3 |
| 1.4 Viento | 3 |
| 1.4.1 Tipos de Viento | 4 |
| 1.5 Descripción del problema en México | 7 |
| 1.5.1 Daños en torres de telecomunicaciones | 8 |
| Capítulo 2 Estado del arte | 12 |
| 2.1.1 Torres de telecomunicación | 12 |
| 2.1.2 MDOC-DV (2008) | 14 |
| 2.1.3 Códigos internacionales | 18 |
| Capítulo 3 Metodología | 21 |
| 3.1 Características de los modelos | 21 |
| 3.1.2 Localización | 25 |
| 3.2 Procedimiento | 25 |
| 3.2.1 Clasificación de la estructura | 27 |
| 3.2.2 Velocidad básica de diseño VD | 28 |
| 3.2.3 Factor de topografía FT | 28 |
| 3.2.4 Factor de exposición Frz | 29 |
| 3.2.5 Velocidad regional VR | 30 |
| 3.2.6 Presión dinámica de base qz | 31 |

| | |
|--|----|
| 3.2.7 Velocidad media VD' | 31 |
| 3.2.8 Fuerza dinámica equivalente en accesorios | 37 |
| 3.2.9 Fuerza en antenas | 38 |
| 3.3 Modelación | 40 |
| 3.3.1 Modelación de las cargas | 40 |
| 3.3.2 Combinaciones de carga | 40 |
| Capítulo 4 Resultados y análisis | 42 |
| 4.1 Resultados del Procedimiento | 42 |
| 4.1.1 Clasificación de la estructura | 42 |
| 4.1.2 Velocidad básica de diseño VD | 43 |
| 4.1.3 Presión dinámica de base qz | 43 |
| 4.1.4 Velocidad media VD' | 44 |
| 4.1.5 Factor de amplificación dinámica FAD | 44 |
| 4.1.6 Coeficientes de arrastre Ca | 45 |
| 4.1.7 Coeficientes de arrastre en accesorios ΔCat | 45 |
| 4.1.8 Fuerza dinámica equivalente Feq | 46 |
| 4.2 Revisión de desplazamientos con base en el incremento de antenas | 48 |
| 4.3 Análisis de los desplazamientos en la torre cuadrada | 50 |
| 4.4 Análisis de los desplazamientos en la torre triangular | 51 |
| 4.5 Estimación del daño normalizado | 52 |
| 4.6 Daño normalizado en torre cuadrada | 53 |
| 4.7 Daño normalizado en torre triangular | 54 |
| Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones | 55 |
| 5.1 Conclusiones | 55 |
| 5.1.1 Desplazamiento por incremento de antenas | 56 |
| 5.1.2 Daño normalizado | 56 |
| 5.2 Recomendaciones | 57 |
| Referencias | 58 |
| Anexo: Modelación de torres de celosía en Sap 2000 | 60 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| <i>Figura 1.1. Capa límite atmosférica.</i> | 3 |
| <i>Figura 1.2. Porcentaje de daños y pérdidas por desastres en México.</i> | 7 |
| <i>Figura 1.3. Torre de telecomunicaciones en San José del Cabo.</i> | 9 |
| <i>Figura 1.4. Antenas sobre el techo de una vivienda.</i> | 9 |
| <i>Figura 1.5. Torre de telecomunicaciones en Coatzacoalcos, Veracruz.</i> | 10 |
| <i>Figura 1.6. Torre de telecomunicaciones tras el paso del huracán María.</i> | 10 |
| <i>Figura 1.7. Torre de telecomunicaciones tras el paso del huracán Michelle.</i> | 11 |
| <i>Figura 1.8. Anclaje tras el paso del huracán Michelle.</i> | 11 |
| <i>Figura 2.1. Elementos estructurales de una torre de telecomunicaciones de celosía.</i> | 13 |
| <i>Figura 2.2. Respuesta dinámica [Madugula, 2002].</i> | 14 |
| <i>Figura 3.1. Dimensiones del modelo de torre de telecomunicaciones de sección transversal cuadrada.</i> | 23 |
| <i>Figura 3.2. Dimensiones del modelo de torre de telecomunicaciones de sección transversal triangular.</i> | 24 |
| <i>Figura 3.3. Diagrama de flujo del procedimiento para el análisis dinámico.</i> | 26 |
| <i>Figura 3.4. Mapa de isotacas para un periodo de retorno de 200 años.</i> | 30 |
| <i>Figura 3.5. Antena tipo tambor y dirección del viento.</i> | 38 |
| <i>Figura 3.6. Fuerzas en las torres a) sección transversal cuadrada b) sección transversal triangular.</i> | 41 |
| <i>Figura 3.7. Distribución de fuerzas en las torres a) sección transversal cuadrada b) sección transversal triangular.</i> | 41 |
| <i>Figura 4.1. Desplazamientos en la torre de sección transversal cuadrada.</i> | 50 |
| <i>Figura 4.2. Desplazamientos en la torre de sección transversal triangular.</i> | 51 |
| <i>Figura 4.3. Daño normalizado en la torre de sección transversal cuadrada.</i> | 53 |
| <i>Figura 4.4. Daño normalizado en la torre de sección transversal triangular.</i> | 54 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| <i>Tabla 2.1. Comparativa de velocidades de diseño.</i> | 20 |
| <i>Tabla 2.2. Comparativa de expresiones de cálculo de diseño.</i> | 20 |
| <i>Tabla 3.1. Características principales de las torres: modelo 1 y modelo 2.</i> | 22 |
| <i>Tabla 3.2. Relación de esbeltez de las torres: modelo 1 y modelo 2.</i> | 22 |
| <i>Tabla 3.3. Valores del factor de topografía.</i> | 28 |
| <i>Tabla 3.4. Valores recomendados para α, δ y c.</i> | 29 |
| <i>Tabla 3.5. Valores de α' y b.</i> | 32 |
| <i>Tabla 3.6. Coeficientes de arrastre C_{at} para torres de celosía.</i> | 33 |
| <i>Tabla 3.7. Valores de z_{min} y α.</i> | 34 |
| <i>Tabla 3.8. Coeficientes de arrastre para antenas microondas tipo tambor obtenidos del MDOC-DV 2008.</i> | 39 |
| <i>Tabla 4.1. Clasificación de la estructura.</i> | 42 |
| <i>Tabla 4.2. Velocidad básica de diseño VD en el tramo 1.</i> | 43 |
| <i>Tabla 4.3. Presión dinámica de base qz en el tramo 1.</i> | 43 |
| <i>Tabla 4.4. Velocidad media VD'.</i> | 44 |
| <i>Tabla 4.5. Factor de amplificación dinámica FAD.</i> | 44 |
| <i>Tabla 4.6. Coeficientes de arrastre Ca en el tramo 1.</i> | 45 |
| <i>Tabla 4.7. Coeficiente de arrastre por accesorios en el tramo 1.</i> | 45 |
| <i>Tabla 4.8. Cálculo de fuerzas equivalentes de torre cuadrada.</i> | 46 |
| <i>Tabla 4.9. Cálculo de fuerzas equivalentes de torre triangular.</i> | 47 |
| <i>Tabla 4.10. Parámetros del FAD para cada incremento.</i> | 48 |
| <i>Tabla 4.11. Fuerzas para antenas tipo tambor.</i> | 49 |
| <i>Tabla 4.12. Desplazamientos en la torre cuadrada.</i> | 50 |
| <i>Tabla 4.13. Desplazamientos en la torre triangular.</i> | 51 |
| <i>Tabla 4.14. Daño normalizado en la torre cuadrada.</i> | 53 |
| <i>Tabla 4.15. Daño normalizado en la torre triangular.</i> | 54 |

NOMENCLATURA

| | |
|---------------------------|--|
| A_{ref} | área de los miembros de la cara frontal, m ² |
| A_a | área de cualquier accesorio ubicado el tramo considerado |
| A_{At} | área proyectada de la torre en el tramo considerado sin accesorios, m ² |
| B | factor de respuesta de fondo |
| b | ancho promedio de la torre, m |
| b_0 | ancho en la base, m |
| b_h | ancho en el extremo superior, m |
| c | coeficiente de escala de rugosidad |
| C_a | coeficiente de arrastre |
| C_{au} | coeficiente de arrastre para accesorio aislado |
| C_d | coeficiente dinámico de respuesta |
| $C_{RG} C_G$ | constantes correctivas de la forma modal |
| D | carga muerta de la estructura |
| D_1 | diámetro de la antena de microondas, m |
| f_1 | frecuencia fundamental, Hz |
| F_{AD} | factor de amplificación dinámica |
| F_{eq} | fuerza dinámica equivalente, N |
| F_M | factor de corrección de masa |
| F_{RZ} | factor de exposición |
| F_T | factor de topografía |
| G | factor de corrección por temperatura y altura |
| G_h | factor de respuesta dinámica |
| h | altura total de la estructura, m |
| I_v | índice de turbulencia a la altura de referencia |
| k_p | factor pico |
| K_{in} | factor de corrección por interferencia |
| K_{re} | factor de corrección por relación de esbeltez |
| M_m | momento |
| m_{total} | masa total de la estructura, kg |
| m_r | masa generalizada en la dirección longitudinal del viento, kg |
| $m(z)$ | masa por unidad de longitud de la torre, kg/m |
| n_1^m | frecuencia natural en el modo fundamental de vibrar, Hz |
| p_z | presión de diseño a la altura z , Pa |
| P_d | daño normalizado |
| q_z | presión dinámica de base, Pa |
| R | factor de respuesta en resonancia |
| $R_h(\eta_h) R_b(\eta_b)$ | funciones de admitancia aerodinámica adimensional |
| $r(t)$ | respuesta estructural generada por el viento |
| $r_s(t)$ | respuesta estructural total |
| \bar{r} | componente de respuesta media constante |
| $S_L(z_s, n_{1,x})$ | densidad de potencia del viento |
| Tr | periodo de retorno, años |

| | |
|-----------------|--|
| V_D | velocidad básica de diseño, km/h |
| V'_D | velocidad media, m/s |
| v_m | velocidad media, m/s |
| V_R | velocidad regional de ráfaga |
| W_0 | fuerza del viento |
| w_1 | peso de la torre con accesorios, kg |
| w | peso de la torre con accesorios arriba del 5% de la altura, kg |
| z | altura media en la cual se desea calcular la velocidad del viento, m |
| α | exponente de la forma de variación del viento con la altura |
| α' | exponente de la variación de la velocidad con la altura |
| δ | altura sobre la cual velocidad es constante |
| $\zeta_{est,x}$ | relación de amortiguamiento estructural |
| θ_a | ángulo de desviación del flujo del viento |
| λ_m | coeficiente de la variación de la forma modal con la altura |
| ϕ | relación de solidez |
| ϕ_1 | configuración modal del primer modo |
| Ω | presión barométrica, mmHg |
| τ | temperatura ambiental, C° |

Nomenclatura AIJ 2005

| | |
|----------|--|
| A | área proyectada a la altura z , m ² |
| C_D | coeficiente de la fuerza del viento |
| C'_g | factor del momento de volteo |
| E_H | factor de perfil de velocidad del viento |
| G_D | factor del efecto de ráfaga |
| k_{rw} | factor de conversión del periodo de retorno |
| K_D | factor de direccionalidad del viento |
| q_H | presión de velocidad, N/m ² |
| R_D | factor de resonancia |
| U_0 | velocidad básica del viento, m/s |
| U_H | velocidad del viento de diseño, m/s |
| W_D | fuerza del viento a la altura z , N |
| ρ | densidad del aire, kg/m ³ |
| ϕ_D | factor de corrección del modal |

Nomenclatura EC-1 2005

| | |
|------------|---|
| A_{ref} | área de referencia |
| c_{alt} | coeficiente de levantamiento aerodinámico |
| c_d | factor dinámico |
| c_{dir} | coeficiente de dirección |
| $c_e(z_e)$ | factor de exposición |
| c_f | factor de fuerza aerodinámica |
| c_{tem} | factor de temperatura |
| F_w | fuerza máxima del viento |

| | |
|-----------|---------------------------------|
| $I_v(z)$ | intensidad de turbulencia |
| q_{ref} | presión máxima del viento |
| Q | excitación quasi-estática |
| R | parte de la respuesta resonante |
| v_{ref} | velocidad de referencia |
| ρ | densidad del aire |

Nomenclatura ASCE 2005

| | |
|----------|---|
| C_p | coeficiente de presión externa |
| C_{pi} | coeficiente equivalente de la presión externa |
| g_Q | factor pico de la respuesta de fondo |
| g_R | factor pico de la respuesta resonante |
| g_v | factor pico de respuesta del viento |
| G | factor de ráfaga |
| G_f | factor de ráfaga para estructuras de sistemas flexibles |
| I | factor de importancia |
| I_z | intensidad de turbulencia |
| K_d | factor de direccionalidad |
| K_z | coeficiente de exposición |
| K_{zt} | factor de topografía |
| p | presión de diseño, N/m ² |
| q_i | presión interna de velocidad |
| q_z | presión de velocidad evaluada a la altura z, N/m ² |
| Q | factor de respuesta de fondo |
| R | factor de respuesta resonante |
| V | velocidad básica del viento (m/s) |
| ρ | factor de densidad del aire |

INTRODUCCIÓN

En México, como en otras partes del mundo, el uso de sistemas de telecomunicaciones está creciendo cada vez más rápido. A partir de 2013, año en que se promulgó la Reforma Constitucional de Telecomunicaciones, el sector ha crecido un 80% con respecto a décadas anteriores. Además, el número de usuarios a estos servicios prácticamente se duplicó entre diciembre de 2012 y junio de 2015 al pasar de 23 a 45 suscriptores por cada 100 habitantes.

La infraestructura de las telecomunicaciones es básica en la actualidad y juega un papel cada vez más importante dentro de la sociedad. La capacidad de poder comunicarse casi instantáneamente constituye un factor indispensable en los medios sociales y económicos. Se usan en cualquier tipo de actividad mercantil, financiera y se han convertido en un medio inherente para la comunicación de masas. Con ella se dan servicios de radio, televisión, telefonía fija, móvil y de datos como el internet a todas las esferas de la sociedad.

No obstante, el principal beneficio de la telecomunicación se presenta durante episodios de desastres naturales. La telecomunicación forma parte de los sistemas extendidos, es decir, aquellos sistemas cuyo funcionamiento no debe interrumpirse durante una emergencia. En caso de fallar, retrasaría la importante tarea de transmitir información a lugares afectados para acciones de auxilio y rescate.

El óptimo servicio de la telecomunicación depende de la implementación de una buena y adecuada infraestructura. En México el 90% de la infraestructura de este sector está representada por torres de telecomunicaciones. Estas torres son el soporte para una gran cantidad de antenas que reciben o transmiten señales, están hechas de estructura metálica en forma de celosía que permiten mayor ligereza y menor consumo de material, lo que las hace más económicas en comparación con otro tipo de soporte.

Para evitar las fallas o colapsos de torres de telecomunicación, se necesita de un minucioso análisis del comportamiento estructural. El análisis debe contemplar el efecto de las cargas que recibirá la estructura, por ejemplo: el peso propio, acciones del viento, acciones sísmicas, acciones por accesorios, etc. Aunque se ha observado que en comparación con otras estructuras, las acciones del viento representan su mayor debilidad dadas sus características de ligereza y esbeltez.

CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

El objetivo de este trabajo es analizar los efectos que produce el viento en torres de telecomunicaciones de distintas geometrías al variar la cantidad de accesorios, su ubicación en la torre y la estimación del daño normalizado.

1.1.2 Objetivos específicos

- Comparar el desplazamiento de la torre ante el aumento en el número de antenas instaladas.
- Determinar el porcentaje de daño normalizado debido a la disminución del área de los elementos estructurales.

1.2 Alcances

Este es un trabajo de análisis sobre el comportamiento dinámico de torres de telecomunicación ante la acción del viento. Se utilizaron dos modelos distintos de torres de celosía auto-soportadas, una de sección transversal triangular y otra cuadrada. Para realizar las pruebas por aumento de accesorios y disminución de área transversal de los elementos estructurales se eligieron dos ubicaciones, Baja California Sur y el Estado de México. Se usaron las recomendaciones del Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento de la Comisión Federal de Electricidad (MDOC-DV 2008) para el cálculo de las fuerzas del viento de acuerdo con el procedimiento estático y dinámico. Por su clasificación de acuerdo con la importancia de la estructura, se analizó con un periodo de retorno de 200 años.

1.3 Justificación

Cada año, México se ve afectado por fenómenos meteorológicos como ciclones tropicales, tormentas y frentes, que traen consigo vientos de hasta 200 km/h. Las torres de telecomunicaciones son estructuras que frecuentemente resultan afectadas por estos meteoros, ya que por sus propiedades dinámicas son muy susceptibles a efectos eólicos.

La afectación de estas torres es un grave problema por su función dentro de la red de comunicación nacional. Ya que el rápido desarrollo de la tecnología ha generado mucha demanda en el uso de la comunicación inalámbrica, cuya instalación depende principalmente de torres de telecomunicaciones. Dada su importancia social y económica, es indispensable que estas estructuras resistan los eventos naturales que las ponen en riesgo, principalmente aquellos relacionados con el viento. Si resultan afectadas, representarían pérdidas económicas por la interrupción del servicio, material dañado y alteración de la vida diaria de la comunidad.

1.4 Viento

El viento es el movimiento del aire generado principalmente por diferencias de presión en la atmósfera y la fuerza de rotación de la Tierra. Las diferencias de presión se producen por la variación en la distribución del calentamiento solar entre los polos y el ecuador, lo que produce distintas temperaturas y presiones en la superficie. Esto, junto con los efectos del movimiento rotacional de la Tierra establece un sistema de circulación a gran escala con orientaciones horizontales y verticales. (Holmes, 2003)

La velocidad del viento varía con la altura, debido a la fricción que existe con la superficie de la Tierra, hasta una distancia límite en donde la velocidad permanece constante como se puede observar en la Figura 1.1. La variación con la altura dependerá de varios factores, como la rugosidad del terreno o los posibles obstáculos cercanos.

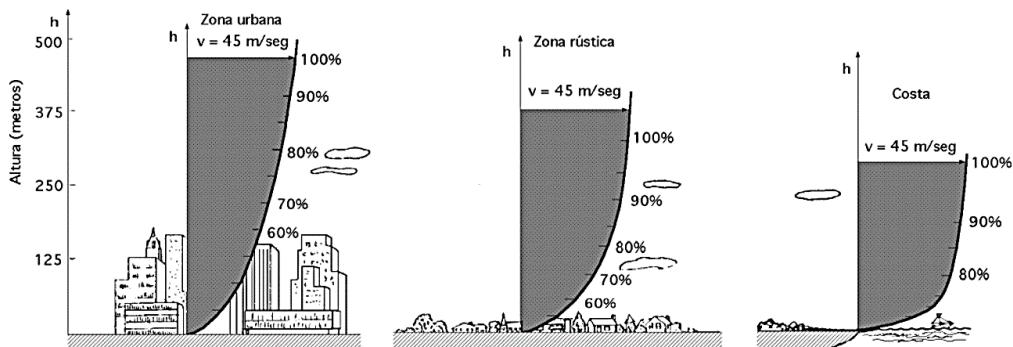


Figura 1.1. Capa límite atmosférica.

La atmosfera terrestre se divide en capas. La capa que se localiza sobre la superficie terrestre se llama Tropósfera y es donde se encuentra la capa límite atmosférica. Esta capa se extiende desde el suelo hasta 1 km de altura aproximadamente; es de extraordinaria importancia debido a que es donde se desarrollan casi todos los fenómenos meteorológicos que nos afectan diariamente. En esta capa límite, el viento se ve afectado por el gradiente de presión y la fuerza de Coriolis, tal como se explica a continuación:

- Gradiente de presión. La temperatura de la atmosfera se distribuye de manera desigual en la superficie del planeta generando variaciones de presión. Cuando las presiones entre dos regiones adyacentes difieren, se genera un gradiente de presión y las masas de aire se desplazan de las zonas de alta presión a las de baja presión. Mientras mayor sea el gradiente, mayor será la velocidad del viento.
- Fuerza de Coriolis. La rotación de la Tierra produce una fuerza llamada Coriolis que desvía en forma curvada a las masas de aire. La fuerza de Coriolis genera efectos centrífugos que inducen un movimiento circular sobre las partículas de aire. Los vientos del hemisferio sur giran hacia la izquierda y los de vientos del hemisferio norte giran hacia la derecha. En el Ecuador, la fuerza de Coriolis es cero por lo que no se forman ciclones en esta zona.

1.4.1 Tipos de Viento

Dependiendo de su escala o dimensión de recorrido, los vientos se pueden clasificar en dos tipos: globales y locales.

- Los vientos globales ocupan una gran extensión de tierra y océano, y transportan gran cantidad de energía eólica. Su origen proviene del calentamiento variable de la superficie terrestre y la fuerza centrífuga. Ejemplo de vientos globales son los frentes fríos y los ciclones tropicales.
- Los vientos locales afectan pequeñas regiones y su comportamiento depende de las características del entorno. Se originan por efectos de convección locales donde las masas de aire se desplazan para equilibrar la diferencia de temperatura y presión. Ejemplo de vientos locales son las tormentas eléctricas y los tornados.

1.4.1.1 Tormenta eléctrica

Una tormenta eléctrica es un fenómeno local que se caracteriza por lluvias intensas, relámpagos y truenos. Las tormentas más severas traen consigo granizo de una pulgada o más, y vientos intensos con velocidades superiores a 92.5 km/h.

Las condiciones necesarias para la generación de una tormenta son:

- Vapor de agua en forma de humedad en la superficie.
- Inestabilidad del aire por un gradiente de presión.
- Mecanismo de elevación que provoque una rápida convección, como una cordillera montañosa o un frente frío.

El proceso físico más importante en una tormenta eléctrica es la convección. La inestabilidad del aire provoca que una corriente ascendente de aire húmedo y caliente (updraft) sea reemplazada por otra corriente descendente de aire frío y seco (downdraft). Cuando el *downdraft* alcanza la superficie se expande y produce vientos intensos conocidos como reventones (downburst). Los reventones se subdividen en microreventón (microburst) y macroreventón (macroburst), dependiendo del tamaño. Generalmente los macroreventones duran entre 5 a 30 min y puede extenderse por más de 4 km, mientras que los microreventones duran entre 5 a 10 min y su extensión es menor de 4 km.

1.4.1.2 Tornados

Un tornado es una columna de aire originada por una nube de convección. Tienen la apariencia de un cilindro o cuerda que se extiende desde la nube de tormenta hasta el suelo. Se presentan principalmente en zonas con planicies continentales como Estados Unidos, Argentina, Rusia y Sudáfrica. En México se han reportado algunos en estados al norte como Chihuahua y Coahuila.

El tornado se forma cuando hay varios cambios de velocidad y dirección en una tormenta eléctrica formando el embudo de viento. Se sabe que los tornados generan los vientos más destructivos, y a pesar de tener una extensión horizontal reducida pueden viajar hasta 50 km antes de disiparse, causando daños en grandes áreas y formar otros tornados o reventones.

1.4.1.3 Frente frío

Este describe el límite entre dos masas de aire con diferente temperatura o contenido de vapor de agua. Durante este fenómeno se presentan descensos de temperatura, heladas, vientos intensos, fuerte oleaje, abundante nubosidad y lloviznas. El frente se forma cuando una masa de aire frío choca con una masa de aire caliente. La masa de aire frío al ser más denso, empuja por debajo a la masa de aire caliente obligándola a elevarse.

1.4.1.4 Ciclón tropical

Los ciclones tropicales son las tormentas más intensas y violentas de la Tierra. La Administración Oceánica y Atmosférica Nacional (NOAA, 1999), define al ciclón tropical como la circulación atmosférica cerrada de origen no frontal con núcleo cálido y longitud horizontal de al menos 1,000 km. Los ciclones son uno de los mecanismos que tiene el sistema terrestre para distribuir la energía calorífica del Sol. Así, el calor de los trópicos se transporta hacia latitudes más altas y mantienen el sistema en equilibrio térmico.

Los ciclones se originan sobre aguas tropicales y subtropicales, principalmente a finales de verano y otoño. Según el lugar donde se formen reciben el nombre de huracán o tifón. Cuando una de estas tormentas se produce en el océano Atlántico norte, en el mar Caribe y en océano Pacífico, se denomina huracán. Por otra parte, en el Pacífico noroccidental estas tormentas reciben el nombre de tifones.

Las condiciones necesarias para la generación de un ciclón son:

- Temperatura superficial del mar de al menos 26.5°C.
- Inestabilidad atmosférica.
- Alta humedad en los niveles inferiores de la tropósfera.
- Suficiente fuerza de Coriolis para desarrollar un centro de baja presión.

La primera fase de la formación de los ciclones tropicales se denomina depresión tropical. Todas las depresiones tropicales que crecen y derivan en ciclones se originan bajo las mismas condiciones y conservan las mismas características meteorológicas a lo largo de su trayectoria. Las diferencias físicas entre una y otra radican en su velocidad y tiempo en el que se desarrollan.

1.5 Descripción del problema en México

En los meses de verano, la temperatura en el mar Caribe, Golfo de México y parte del océano Pacífico puede alcanzar los 29°C, lo que crea zonas ideales para la generación de ciclones tropicales. En México la temporada de huracanes comienza en mayo en la zona del Pacífico y en junio del lado del Atlántico y ambas terminan hasta finales de noviembre. Por su proximidad al mar, las zonas costeras siempre resultan las más afectadas. Los estados que corren mayor riesgo son Baja California Sur, Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Quintana Roo, Veracruz y Tamaulipas.

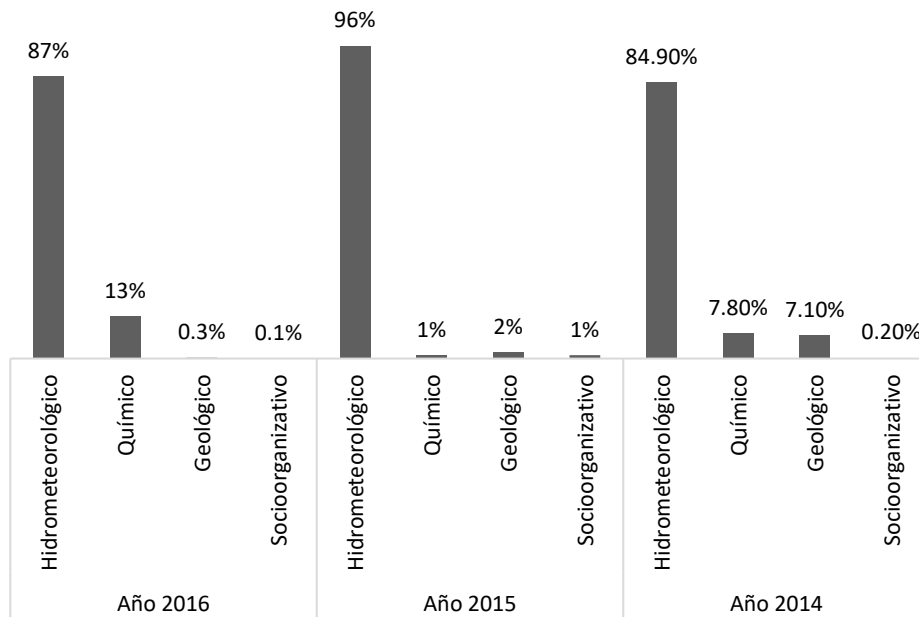


Figura 1.2. Porcentaje de daños y pérdidas por desastres en México.

Nuestro país también es víctima de las bajas temperaturas y los fuertes vientos generados por frentes fríos que se originan cerca del polo norte. Después de atravesar Canadá y los Estados Unidos de América, cruzan el territorio nacional, del noroeste al sureste y pueden prolongarse de tres a siete días. La temporada de frentes fríos en México va de septiembre a mayo y aunque en nuestro territorio su frecuencia es muy variable, en promedio se registran alrededor de 58 al año, la mayoría dentro de la temporada invernal. Los estados en el norte del país como Chihuahua, Coahuila, Nueva León, Tamaulipas y Puebla, son los que más resienten los efectos de los frentes fríos.

La República Mexicana está localizada en un área donde las condiciones atmosféricas y geográficas propician fenómenos meteorológicos extremos. La Figura 1.2 elaborada con datos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), de los años 2014 al 2016, muestra que el mayor monto de daños y pérdidas en estos últimos años corresponden a este tipo de fenómenos. Esto es un indicador de la importancia que se le debe dar a su estudio dentro de la ingeniería, para tratar de reducir sus devastadores efectos.

1.5.1 Daños en torres de telecomunicaciones

1.5.1.1 Huracán Odile, Baja California Sur

El 4 de septiembre de 2014 el Centro Nacional de Huracanes indicó la formación de un huracán de categoría IV al sur de México, frente a las costas de Guerrero y Michoacán. Luego de desplazarse erráticamente por varios días, el día 13 comenzó a moverse hacia el noroeste. Finalmente el día 14, Odile llegó a la Península de Baja California como huracán de categoría III y vientos máximos sostenidos de 205 km/h.

Odile ha sido el huracán más intenso sobre la Península de Baja California. El ciclón dejó 5 muertos y pérdidas económicas estimadas en 24 mil millones de pesos. La infraestructura de telecomunicación resultó afectada y diversas fuentes periodísticas informaron que el estado se quedó prácticamente incomunicado.

Murià-Vila et al. (2018) realizaron un informe sobre el desempeño de la infraestructura de telecomunicación tras el paso del huracán. De acuerdo con el recorrido por el sur del estado, se observaron torres y antenas de telefonía celular que habían tenido buen desempeño. Sin embargo, se apreciaron fallas en estructuras para antenas localizadas en techos de casa y edificios con componentes pesados en los extremos superiores. También se informó sobre la caída de una torre de telecomunicaciones que afectó a varios vehículos y viviendas en San José del Cabo Figura 1.3.

En la Figura 1.4 se aprecia la fotografía de una torre instalada sobre el techo de una vivienda. La torre de sección transversal triangular soportaba una antena parabólica en el extremo superior.



Figura 1.3. Torre de telecomunicaciones en San José del Cabo.



Figura 1.4. Antenas sobre el techo de una vivienda.

1.5.1.2 Tormentas Severas, Veracruz

El 6 de agosto del 2018 en Coatzacoalcos, Veracruz, una torre de telecomunicaciones colapsó tras las fuertes tormentas que se habían presentado. Los reportes indicaron que los tirantes que la sostenía se rompieron, provocando que la torre se partiera en dos. En la Figura 1.5 se aprecia la imagen de como la torre falló en dos zonas. La primera falla se presentó sobre el domo del edificio del Ayuntamiento de Coatzacoalcos y la segunda fue después de caer contra una saliente de una estructura aledaña. En esta segunda falla se pueden observar algunos equipos que sostenía la torre.



Figura 1.5. Torre de telecomunicaciones en Coatzacoalcos, Veracruz.

1.5.1.3 María, Puerto Rico

El huracán María, conocido como el peor desastre natural en afectar a República Dominicana y Puerto Rico, azotó las islas el 20 de septiembre del 2017. Fue el décimo huracán más intenso en la cuenca del Atlántico y el huracán más intenso de su temporada. Los daños causados por el huracán María a la red de telecomunicaciones de Puerto Rico superaron los 1,000 millones de pesos.

La Figura 1.6 muestra la fotografía de una torre auto-soportada en la localidad de Aguas Buenas después de caer tras el paso del huracán María. Se observa que la torre se deformó aproximadamente a un tercio de la base con respecto a su altura, por lo que las antenas que se encontraban colocadas quedaron inservibles.



Figura 1.6. Torre de telecomunicaciones tras el paso del huracán María.

1.5.1.4 Michelle, Cuba

El 4 de noviembre del 2001 el huracán Michelle de categoría IV, azotó Cuba con ráfagas de viento de 215 km/hr y lluvias torrenciales. Un artículo de Parnás (2008), recopila en fotografías los efectos que tuvo Michelle sobre una torre de telecomunicaciones con retenidas (Figuras 1.7 y 1.8).

Se estima que la torre estuvo expuesta una velocidad de viento de 144 km/h en el momento de la falla, que se presentó a 10 m de altura. Se reportó que la torre no sufrió ninguna deformación o rotura en el anclaje que se encontraba en la dirección de la caída, debido a que no alcanzó grandes esfuerzos. Sin embargo, el resto de los anclajes y elementos de unión de los cables al cimiento se deformaron pero ninguno de ellos se rompió. Se cree que la falta de mantenimiento pudo ser un elemento que influyó en la caída de la torre, ya que algunos elementos de los anclajes presentaban corrosión. También se observó que dos de los tres pernos que anclaban una columna se fragmentaron, debido a que la caída hiciera que no resistieran los esfuerzos de cortante.



Figura 1.7. Torre de telecomunicaciones tras el paso del huracán Michelle.



Figura 1.8. Anclaje tras el paso del huracán Michelle.

CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE

Para evitar o disminuir el número de fallas en torres de telecomunicaciones, es necesario el estudio de su comportamiento estructural frente a la acción del viento, así como otras posibles causas que determinen los daños. A partir de estudios se pueden elaborar nuevos modelos y teorías que eviten repetir el error y mejoren la capacidad de las estructuras. La ingeniería de viento aplicada al análisis de torres de telecomunicaciones es una inversión que en el futuro equilibra los costos iniciales de construcción y reforzamiento, contra los costos que representaría la interrupción de los servicios o reemplazamiento total de la torre.

2.1.1 Torres de telecomunicación

Las torres de telecomunicación son estructuras de celosía metálica de altura considerable construidas para soportar equipos de radiodifusión y telecomunicación. Existe una gran cantidad de modelos de torres, cada una con características particulares en su diseño, geometría, materiales, etc. Hernández et al. (2010) menciona que las torres de telecomunicación comúnmente construidas en México son del tipo auto-soportadas, formadas por marcos de celosía con perfiles estructurales de acero y apoyadas en tres o cuatro patas para formar el sistema estructural principal. Además, señala que el 80% de las torres que se construyen en México tienen una altura mayor a los 30 m.

2.1.1.1 Descripción de una torre de telecomunicación

Los principales elementos estructurales de las torres de celosía auto-soportadas son las columnas, diagonales y elementos transversales (Figura 2.1). Cuando estos elementos se unen, forman la celosía principal en arreglos de rombo, zigzag o zigzag doble. Algunos diseños ocupan una celosía secundaria de diagonales y transversales de menor tamaño que le dan mayor rigidez a la estructura. La celosía en su totalidad, está formada de elementos de acero linealmente unidos entre sí por sus extremos. Estos elementos son perfiles de sección L o tubular unidos a través de soldaduras o ángulos con tornillos de acero. En planta, la sección transversal de este tipo de torres es variable, aunque usualmente se ocupan secciones triangulares o rectangulares. En elevación, la geometría puede ser paralela a los lados o ir disminuyendo el ancho de la sección transversal, dándole una forma tronco-piramidal.

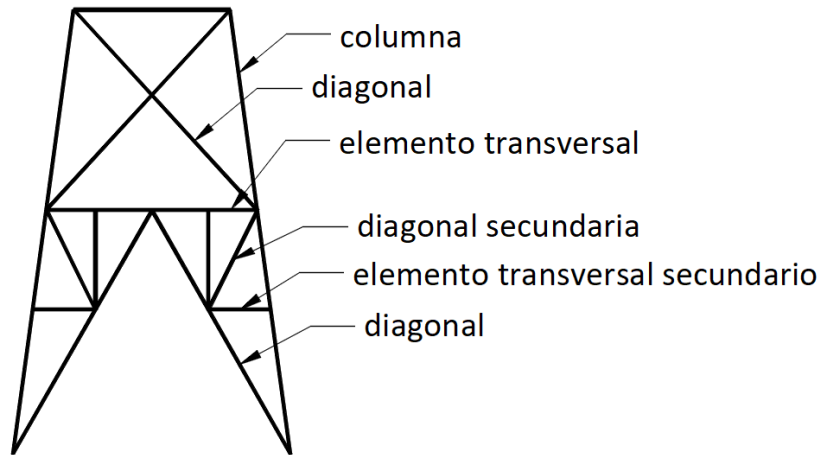


Figura 2.1. Elementos estructurales de una torre de telecomunicaciones de celosía.

2.1.1.2 Respuesta dinámica

La forma típica de respuesta dinámica de torres auto-soportadas frente a la acción del viento se muestra en la Figura 2.2a. En la figura se muestra la respuesta $r(t)$, que representa cualquier acción estructural como fuerza axial, desplazamiento o cortante, generada por el viento. La respuesta total $r_s(t)$ está separada en una componente media constante \bar{r} y una componente dinámica que fluctúa aleatoriamente sobre el valor medio de respuesta. [Madugula, 2002].

Asimismo, se ha planteado que la respuesta fluctuante o pico de la estructura, paralela al flujo del viento, puede descomponerse en dos componentes, una llamada respuesta de fondo, debida al flujo medio del viento, y otra llamada respuesta resonante debida a las fluctuaciones del viento causadas por la turbulencia en el flujo y a las propiedades aerodinámicas de la estructura. De manera gráfica estos componentes se representan en la Figura 2.2b.

El área bajo la curva en el espectro de potencia representa la varianza de la respuesta correspondiente. En la componente no resonante, la energía se extiende sobre una amplia gama en el intervalo de bajas frecuencias, que representa la respuesta semi-estática para las ráfagas de viento de mayor duración. La componente resonante consta de una serie de picos muy concentrados, ubicados en las frecuencias naturales de la estructura [Loredo-Souza, 1998].

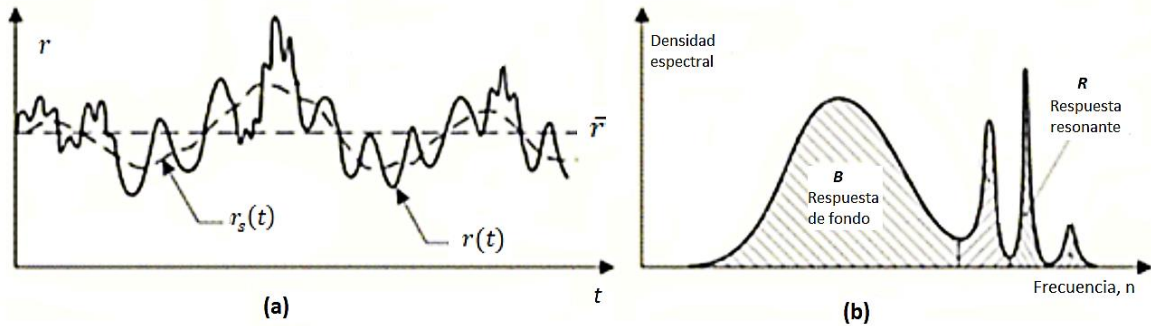


Figura 2.2. Respuesta dinámica [Madugula, 2002].

Los métodos para el análisis de la respuesta de las torres auto-soportadas bajo la acción del viento, se basan en procedimientos para tomar en cuenta las componentes: media, de fondo y resonante. Todos los métodos incluyen el análisis de la respuesta media o componente estática; pero las consideraciones de la componente dinámica, de fondo y resonante, varía en función de las características de la estructura.

Los métodos más utilizados para el análisis de torres auto-soportadas son:

- Método estático “Factor de Velocidad de Ráfaga”
- Métodos dinámicos
 - “Factor de efecto de ráfaga” el más aplicado en normas internacionales
 - “Líneas de influencia” no incluido en normas internacionales

2.1.2 MDOC-DV (2008)

Los códigos de viento son documentos que permiten hacer el análisis y diseño de estructuras mucho más práctico y rápido. Se han ganado la aceptación dentro de la Ingeniería Civil, ya que están basados en extensas investigaciones que por necesidad han tenido que ser simplificadas. Los códigos se van actualizando mientras más conocimiento se tiene sobre los fenómenos, por lo que están en constante revisión y refinamiento.

En México una de las publicaciones más utilizadas para el diseño por viento es el Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento de la Comisión Federal de Electricidad MDOC-DV (2008). La primera versión fue elaborada en 1993 con base en el Código Canadiense. Más tarde en el 2008, tras el importante avance en el desarrollo de la investigación, el manual se actualizó incorporando nuevos criterios de diseño y mapas de isotacas. Para esta nueva edición se realizó una exhaustiva revisión en busca de generar un documento con estándares internacionales.

2.1.2.1 Análisis dinámico (MDOC-DV, 2008)

EL MDOC-DV (2008), propone dos procedimientos para la evaluación de estructuras al paso del flujo del viento: un análisis estático y un análisis dinámico. El estático se aplica a estructuras rígidas del Tipo 1 y el dinámico se aplica para estructuras sensibles a la acción del viento Tipo 2, 3 y 4. Las torres de telecomunicación son estructuras con una relación de esbeltez elevada, sección transversal reducida y periodos naturales de vibración que favorecen la ocurrencia de oscilaciones importantes. Por esto, el manual clasifica a las torres auto-soportadas como estructura Tipo 2 y deben ser analizadas con el análisis dinámico.

El análisis dinámico permite evaluar las cargas por viento considerando la respuesta amplificada por la interacción dinámica entre el flujo del viento y la estructura, particularmente de aquellas estructuras altas y esbeltas con amortiguamiento bajo. Para determinar los efectos del viento utilizando el método dinámico debe tomarse en cuenta características de la torre, tales como altura, ancho, frecuencia natural de vibración y amortiguamiento. También deben considerarse las características del viento en el sitio de interés que está en función de la altura sobre el nivel de desplante y la rugosidad del terreno.

En diversos códigos internacionales el cálculo de la respuesta dinámica se ha planteado en términos de la velocidad asociada a un tiempo de promediación de diez minutos. En el MDOC-DV (2008) los efectos de la interacción dinámica entre el flujo del viento y una estructura se evalúan a partir de la velocidad media de diseño (V'_D , m/s). En el Tomo de Recomendaciones del MDOC-DV (2008), se transforma la velocidad regional de ráfaga (V_R) en la velocidad de diseño (V'_D) con tiempo de promediación de diez minutos. La expresión con el que se realiza dicha transformación es el factor de exposición para la velocidad media (F_{rz}).

El valor de la velocidad regional (V_R) con la que se calculan la velocidad de diseño (V_D), se obtiene de los mapas de isotacas que contiene el MDOC-DV. Cada mapa corresponde a periodos de retorno de 200, 50 o 10 años, de acuerdo con la importancia de la estructura. Las velocidades regionales recomendadas en estos mapas están asociadas a lapsos de promediación de 3s y evaluadas a una altura de 10 m en terreno plano. Ya que las torres de telecomunicaciones son estructuras con un grado de seguridad elevado, se catalogan como estructuras del Grupo A, para las cuales debe emplearse un periodo de retorno (Tr) de 200 años.

En los alcances del manual, se menciona que, para la determinación de las velocidades del viento, solo se consideraron aquellos efectos producidos por tormentas y huracanes que ocurren normalmente durante todo el año en el país. No se consideran la influencia de vientos generados por tornados ni por tormentas locales de corta duración, por lo que se debe consultar a expertos en la materia para localidades donde estos fenómenos sean significativos.

2.1.2.2 Torres de Telecomunicaciones en el MDOC-DV (2008)

El MDOC-DV (2008) tiene consideraciones especiales dentro del análisis dinámico para torres de celosía auto-soportadas, que las diferencian del método utilizado para construcciones prismáticas y cilíndricas. Algunas de estas consideraciones son el Factor de Amplificación Dinámica (F_{AD}) especial y el uso de coeficientes de arrastre (C_a) en lugar de coeficientes de presión.

2.1.2.2.1 Factor de Amplificación Dinámica (F_{AD})

El factor de amplificación dinámica (F_{AD}) toma en cuenta las características fluctuantes del viento y las propiedades físicas y dinámicas de las estructuras. Puede definirse como la relación entre la máxima respuesta que incluye los efectos de fondo y resonancia y aquella que ignora ambos efectos. El denominador de esta relación es de hecho la respuesta calculada empleando los métodos “estáticos” en diversos códigos internacionales (Holmes, 2015). En el MDOC-DV este factor de respuesta dinámica se ha denominado simplemente Factor de Amplificación Dinámica (F_{AD}).

El Factor de Amplificación Dinámica (F_{AD}) para estructuras tipo celosía apoyadas directamente sobre el terreno, es el recomendado por el código japonés, Architectural Institute of Japan (AIJ, 2005). El procedimiento considera que la forma modal fundamental está dada por la expresión 2.1, en donde se desprecian los modos superiores de vibración. El coeficiente λ_m puede calcularse de un ajuste por mínimos cuadrados de la forma modal de interés, a partir de un modelo de análisis discreto.

$$\phi_1(z) = (z/h)^{\lambda_m} \quad (2.1)$$

donde:

- ϕ_1 configuración modal del primer modo.
- λ_m coeficiente que determina la variación de la forma modal con la altura.
- z altura medida en la cual se desea calcular la velocidad media del viento, (m).
- h altura de la estructura, (m).

Para el cálculo de la frecuencia de vibrar de la torre deben contemplarse la masa concentrada de las antenas y la masa debida a todos los accesorios colocados en ella. El MDOC-DV (2008) propone utilizar la expresión 2.2 (Madugula, 2002), para estimar en forma aproximada la frecuencia fundamental, f_1 (Hz), de una torre auto-soportada de celosía:

$$f_1 = \frac{1500b}{h^2} \quad (2.2)$$

donde:

- b ancho promedio de la torre, $b = (b_h + b_0)/2$, (m).
- b_h ancho de la estructura de celosía en la parte superior, (m).
- h altura total de la torre, (m).

En caso de que exista una masa concentrada en la estructura, debido a los discos de las antenas, la frecuencia fundamental modificada, n_1^m (Hz), puede calcularse con:

$$n_1^m = n_1 \sqrt{\frac{w_1}{w_1 + w_2}} \quad (2.3)$$

$$w_1 = w \left[\left(\frac{b}{b_0} \right)^2 + 0.15 \right] \quad (2.4)$$

donde:

- w peso total de la torre, incluyendo todos los accesorios.
- w_1 peso total de la torre modificado.
- w_2 peso de la torre y los accesorios colocados arriba del 5% de la altura de la torre.
- b_0 ancho de la base de la torre, (m).

2.1.2.2.2 Coeficientes de arrastre (C_a)

A diferencia de los coeficientes de presión, al aplicar un coeficiente de arrastre se obtiene la presión total en la dirección del flujo de viento. La metodología para evaluar las presiones del viento del MDOC-DV (2008) es semejante a la de norma australiana, (AS/NZS 1170.2.2002, 2005). Los valores se han definido con base en resultados de pruebas en túnel de viento y validados mediante una comparación con resultados de pruebas del mismo tipo llevadas a cabo en Canadá, Estados Unidos de América, Inglaterra, Suiza y Alemania.

2.1.3 Códigos internacionales

Al revisar la bibliografía de otras normas y códigos se encontró que la mayoría de los códigos de diseño eólico en el mundo proponen cálculos similares para obtener la respuesta dinámica de estructuras. (Hernández, 2009). El método más recurrido es el método simplificado en el que existe un solo factor de respuesta o factor de amplificación, el F_{AD} en el caso del MDOC-DV, (2008), en todos los puntos de la estructura considerada como un oscilador de un grado de libertad.

Las diferencias entre los diferentes códigos son aspectos como las velocidades de referencia dependiendo de las zonas y fenómenos meteorológicos del país, factor de modificación por el tipo de terreno, altura, dirección del viento, factores de forma y efectos dinámicos de resonancia de estructuras flexibles. La Tabla 2.1 muestra los diferentes parámetros utilizados en algunos códigos para el cálculo de la velocidad de diseño.

2.1.3.1 Código Japonés 2005, (AIJ)

En la última actualización de las recomendaciones del AIJ (2005), para diseño por viento, se incorporó un método de cálculo para torres de celosía autosoportadas, factores de direccionalidad, combinaciones de carga de viento, efectos topográficos y factores de forma.

Japón se encuentra expuesto frecuentemente a eventos meteorológicos como ciclones tropicales, *down-bursts* y tornados. Sin embargo, muy pocos tornados y reventones han sido registrados por su red meteorológica. Por lo tanto, las recomendaciones están enfocadas a vientos causados por ciclones. El AIJ contiene mapas de velocidades de viento para periodos de retorno de 100 y 500 años, con tiempo de promediación de 10 min medidas a 10 m sobre el terreno plano.

El AIJ propone un método detallado para estructuras sensibles dentro del cual existe una ecuación especial para calcular las fuerzas del viento en torres de celosía, mostrado en la Tabla 2.2. Además, contiene los coeficientes de fuerza para celosías en función de su relación de esbeltez y dirección del viento. Para obtener las cargas a lo largo del viento "*Along-wind loads*" en torres de celosía, el AIJ propone una ecuación que incorpora un factor de ráfaga estático.

2.1.3.2 Eurocódigo 2005, (EC-1)

El Eurocódigo es un conjunto de normas técnicas que sirve como alternativa a las diferentes normas vigentes de distintos países de la Unión Europea. Su objetivo es la eliminación de obstáculos técnicos y estandarizar las especificaciones técnicas. El EC-1 contiene un apartado para el diseño por viento, en el que se proporcionan reglas y ecuaciones mostradas en la Tabla 2.2 para el cálculo de las cargas en estructuras de edificación de hasta 200 m de altura.

En el EC-1, la velocidad media (v_m) se obtiene mediante la velocidad básica del viento (v_b) que depende del clima, la altura, rugosidad del terreno y topografía. Contiene información meteorológica y mapas nacionales para obtener la velocidad del viento de referencia ($v_{b,0}$). La mayoría de estas velocidades están referidas a periodos de 10 minutos, medidas a 10 m, excepto en algunos países como Austria e Islandia donde se debe hacer una conversión.

El EC-1 proporciona un método detallado para estructuras susceptibles a la excitación dinámica. Presenta un procedimiento detallado del cálculo del coeficiente dinámico de respuesta (C_d) para estructuras especiales, sin embargo no existen normas especiales para torres de celosía.

2.1.3.3 ASCE 2005

El ASCE propone tres métodos de análisis: método simplificado, método analítico y un método para túnel de viento. El primer método denominado “método simplificado” se ocupa para estructuras menores de 18 m. El procedimiento analítico se usa para el diseño de estructuras inestables mostrado en la Tabla 2.2, sin embargo advierte que las torres de celosía no entran dentro de este análisis y se deben diseñar usando otra literatura. A pesar de eso, sí incluye coeficientes de fuerza y factores de direccionalidad especiales para torres de celosía. El método para túnel de viento da las recomendaciones que se deben seguir en un estudio para una estructura mediante un modelo a escala en un túnel de viento.

El proceso analítico del ASCE consiste en la determinación de direccionalidad del viento, factor de efecto de ráfaga, coeficiente de fuerza y presión. El cálculo de la velocidad básica cuenta con un mapa del territorio de los Estados Unidos con velocidades de vientos huracanados. Las velocidades de ráfaga están referidos a periodos de retorno de 50 años. Las velocidades corresponden a periodos de promediación de 3 s medidas a 10 m sobre terreno. El intervalo de velocidades se encuentra entre 101 km/h y 240 km/h.

Tabla 2.1. Comparativa de velocidades de diseño.

| Código | MDOC-DV 2008 | AIJ 2005 | EC-1 2005 | ASCE 2005 |
|------------------------|-------------------|------------------------------------|-----------|---------------|
| Tiempo de promediación | 3s | 10 min | 10 min | 3s |
| Altura de promediación | 10 m | 10 m | 10 m | 10 m |
| Periodos de retorno | 200, 50 y 10 años | 100, 500 años 1 año de servicio | 50 años | 50 y 100 años |

Tabla 2.2. Comparativa de expresiones de cálculo de diseño.

| | MDOC-DV 2008 | AIJ 2005 |
|------------------------------|---|--|
| Velocidad básica de diseño | $V_D = F_T F_{rz} V_R$ | $U_H = U_0 K_D E_H k_{rw}$ |
| Presión dinámica de base | $q_z = 0.047 G V_D^2$ | $q_H = \frac{1}{2} \rho U_H^2$ |
| Fuerza dinámica equivalente | $F_{eq}(z) = p_z A_{exp} F_{AD}$ | $W_D = q_H C_D G_D A$ |
| Factor de respuesta dinámica | $F_{AD} = \frac{1 + 2k_p I_v(z_s) \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7I_v(z_s)}$ | $G_D = 1 + g_D \frac{C'_g}{C_g} \phi_D \sqrt{1 + R_D}$ |

| | EC-1 2005 | ASCE 2005 |
|------------------------------|--|---|
| Velocidad básica de diseño | $v_{ref} = c_{dir} c_{tem} c_{alt} v_{ref}$ | V |
| Presión dinámica de base | $q_{ref} = \frac{1}{2} \rho v_{ref}^2$ | $q_z = \left(\frac{1}{2}\right) \rho K_z K_{zt} K_d V^2 I$ |
| Fuerza dinámica equivalente | $F_w = q_{ref} c_e(z_e) c_d c_f A_{ref}$ | $p = q G_f C_p - q_i (G C_{pi})$ |
| Factor de respuesta dinámica | $c_d = \frac{1 + 2g I_v(z) \sqrt{Q^2 + R^2}}{1 + 7I_v(z)}$ | $G = 0.925 \left(\frac{(1 + 1.7g_Q I_z \sqrt{g_Q^2 Q^2 + g_R^2 R^2})}{1 + 1.7g_v I_z} \right)$ |

Nota: Los parámetros de la Tabla 2.2 se encuentran definidos en la Nomenclatura.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

En este capítulo se describe el procedimiento y los criterios de análisis para los modelos de torres de telecomunicaciones. Para el cálculo de las acciones de viento, se ocupó la normatividad del Manual de Obras Civiles para Diseño por Viento de la Comisión Federal de Electricidad (2008). Dentro de este manual, se considera a las torres de telecomunicaciones como estructuras sensibles a la acción del viento y se recomienda emplear el análisis dinámico.

Además en esta sección, se exponen las características estructurales de las torres seleccionadas y consideraciones asumidas en el proceso de modelación como la geometría, condiciones de apoyo y tipo de material. Para este proceso se utilizó el programa computacional SAP 2000 v14, software basado en el método de elementos finitos (Computers & Structures Inc., 1995).

3.1 Características de los modelos

3.1.1.1 Torre cuadrada

El primer modelo es una torre de 40 m de altura, de sección transversal cuadrada que se va reduciendo con la altura desde un ancho en la base de 5.08 m, hasta 1.82 m en la parte superior. En la base, la celosía principal tiene forma triangular y está complementada con una celosía secundaria de diagonales y transversales hasta los 23.41 m, de ahí la configuración de la celosía principal cambia a un zigzag doble. Los elementos que forman las piernas de la torre, las transversales y diagonales son ángulos de lados iguales que varían de espesor con la altura. Sobre la cara izquierda de la torre se cuenta con una cama guía con un peso promedio de 20 kg/m, sobre la cual se apoyan líneas de conducción para doce cables de 2.819 cm de diámetro. En la cara posterior se ubica una escalera formada de ángulos de la misma geometría que la cama guía. Tanto la cama guía como la escalera, se desarrollan en toda la altura de la torre. La cara que quedó libre se usó para la colocación de antenas tipo tambor. Los detalles geométricos y estructurales de la torre, cama guía y escalera se muestran en la Figura 3.1.

3.1.1.2 Torre triangular

El segundo modelo es una torre de 31 m de altura, de sección transversal triangular. La sección transversal se va reduciendo con la altura desde un ancho en la base de 3 m, hasta 0.8 m en la parte superior. La celosía principal en la base tiene forma de rombo complementada con una celosía secundaria de diagonales y transversales hasta los 12.5 m, de ahí la configuración de la celosía principal cambia a un zigzag doble. Tal como en la torre cuadrada, la torre triangular está formada por perfiles estructurales de acero de lados iguales que varían de espesor con la altura. En la cara frontal de la torre se tiene una cama guía con un peso promedio de 16 kg/m sobre la cual se apoyan líneas de conducción para doce cables de 2.819 cm de diámetro. En la cara posterior izquierda se ubica la escalera formada de ángulos de la misma geometría que la cama guía. Tanto la cama guía como la escalera, se desarrollan en toda la altura de la torre. La cara sin accesorios se utilizó para la colocación de antenas tipo tambor. Los detalles geométricos y estructurales de la torre, cama guía y escalera se muestran en la Figura 3.2.

En la siguiente tabla se resumen las características principales de los modelos. Para esta sección no se consideró el peso de antenas, por lo que el peso, el periodo y la frecuencia son datos reportados tomando en cuenta únicamente la estructura principal de la torre con cama guía, cables y escalera.

Tabla 3.1. Características principales de las torres: modelo 1 y modelo 2.

| Torre | No. de Col. | Altura (m) | Peso (kgf) | Extremo en la base b_0 (m) | Extremo superior b_h (m) | Frecuencia f (hz) |
|----------|-------------|------------|------------|------------------------------|----------------------------|---------------------|
| Modelo 1 | 4 | 40 | 17 726 | 5.08 | 1.82 | 1.666 |
| Modelo 2 | 3 | 31 | 5 113 | 3 | 0.8 | 1.757 |

Tabla 3.2. Relación de esbeltez de las torres: modelo 1 y modelo 2.

| Torre | h (m) | b_0 (m) | b_h (m) | $b=(b_0+b_h)/2$ | Relación de esbeltez $\lambda=h/b$ |
|----------|---------|-----------|-----------|-----------------|------------------------------------|
| Modelo 1 | 40 | 5.08 | 1.82 | 3.45 | 11.59 |
| Modelo 2 | 31 | 3 | 0.8 | 1.9 | 16.32 |

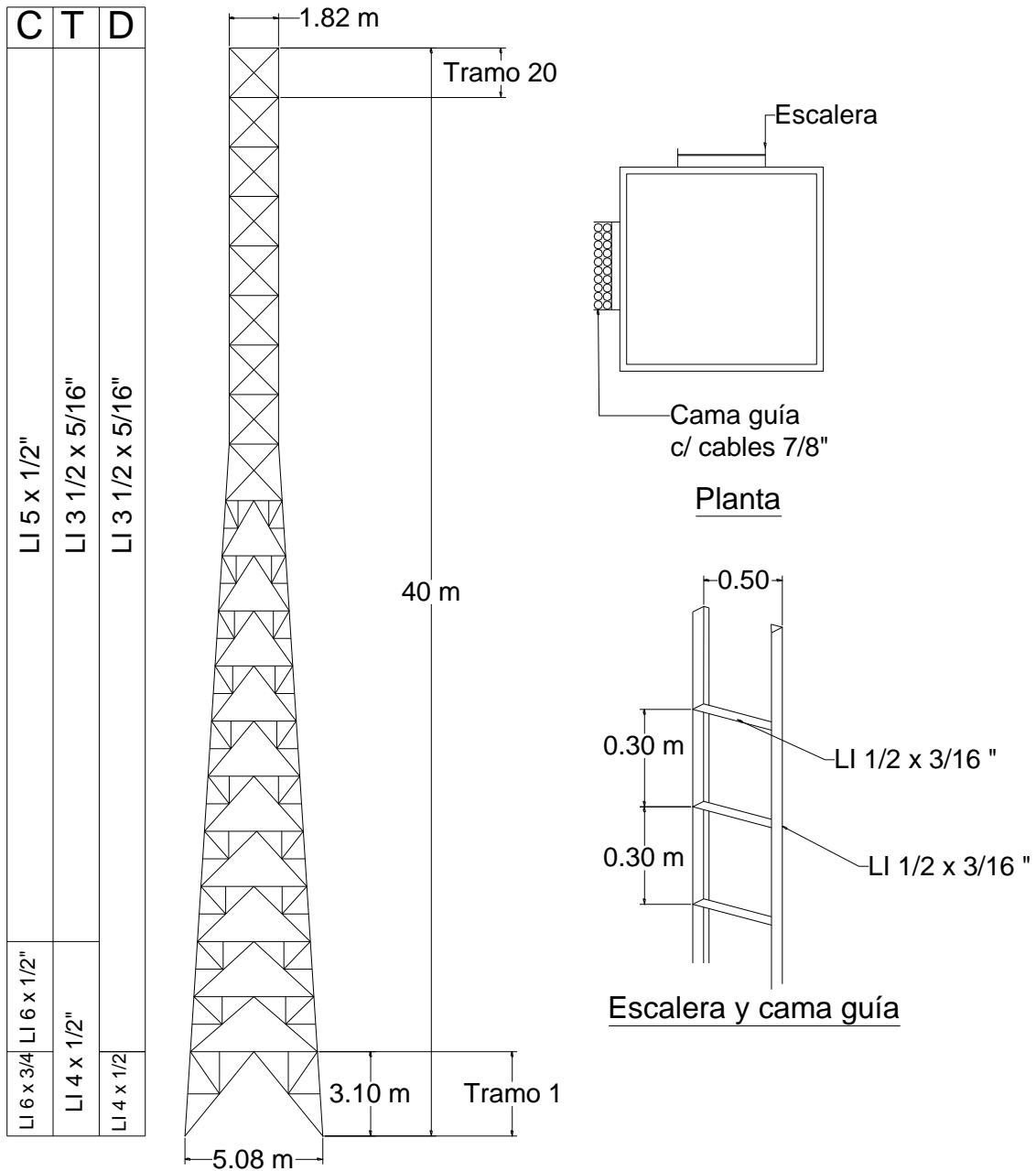


Figura 3.1. Dimensiones del modelo de torre de telecomunicaciones de sección transversal cuadrada.

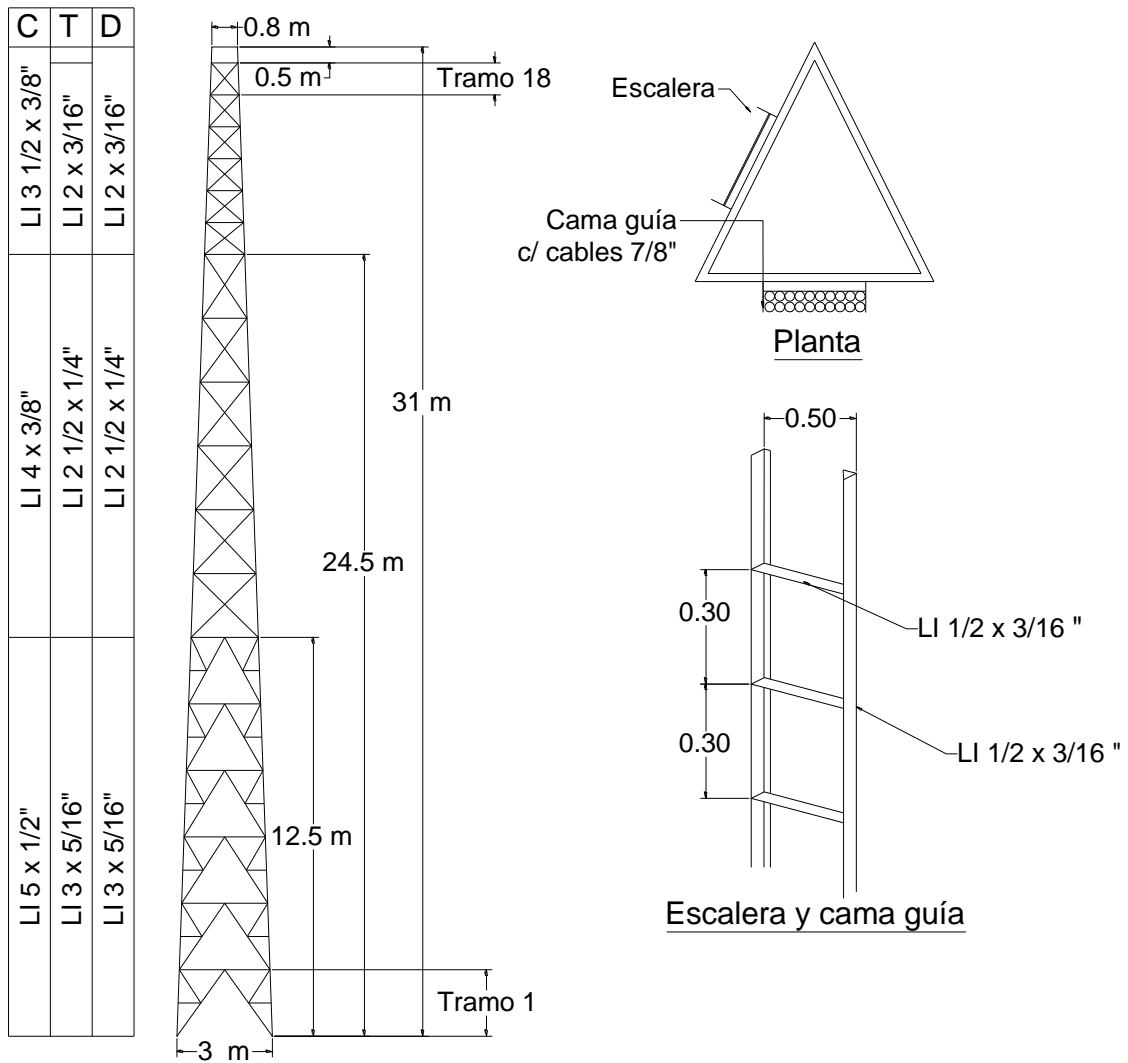


Figura 3.2. Dimensiones del modelo de torre de telecomunicaciones de sección transversal triangular.

3.1.2 Localización

3.1.2.1 Torre cuadrada

La torre de sección cuadrada se ubica en la localidad de Puerto Cortés en Baja California Sur. La altura sobre el nivel del mar del sitio es de 10 m y la temperatura media anual es de 19.9°C. El terreno aledaño elegido es una zona costera con pocas obstrucciones y topografía local plana.

3.1.2.2 Torre triangular

La torre de sección triangular se ubica en la ciudad de Toluca en el Estado de México. La altura sobre el nivel del mar del sitio es de 2680 m y la temperatura media anual es de 13.4°C. El terreno aledaño elegido es plano con pocas obstrucciones y topografía local plana.

3.2 Procedimiento

Para el procedimiento se utilizaron las recomendaciones del análisis dinámico del Manual de Obras Civiles para Diseño por Viento 2008. El análisis consiste una serie de expresiones para obtener las fuerzas equivalentes por viento F_{eq} que actúan sobre la estructura. Estas fuerzas se obtienen de acuerdo con la clasificación de la estructura, periodo de retorno, velocidades de diseño, Factor de Amplificación Dinámica, presión dinámica y coeficientes de arrastre propuestas en el MDOC-DV (2008). La Figura 3.3 muestra un diagrama de flujo del orden en el que se obtuvieron cada uno de los resultados.

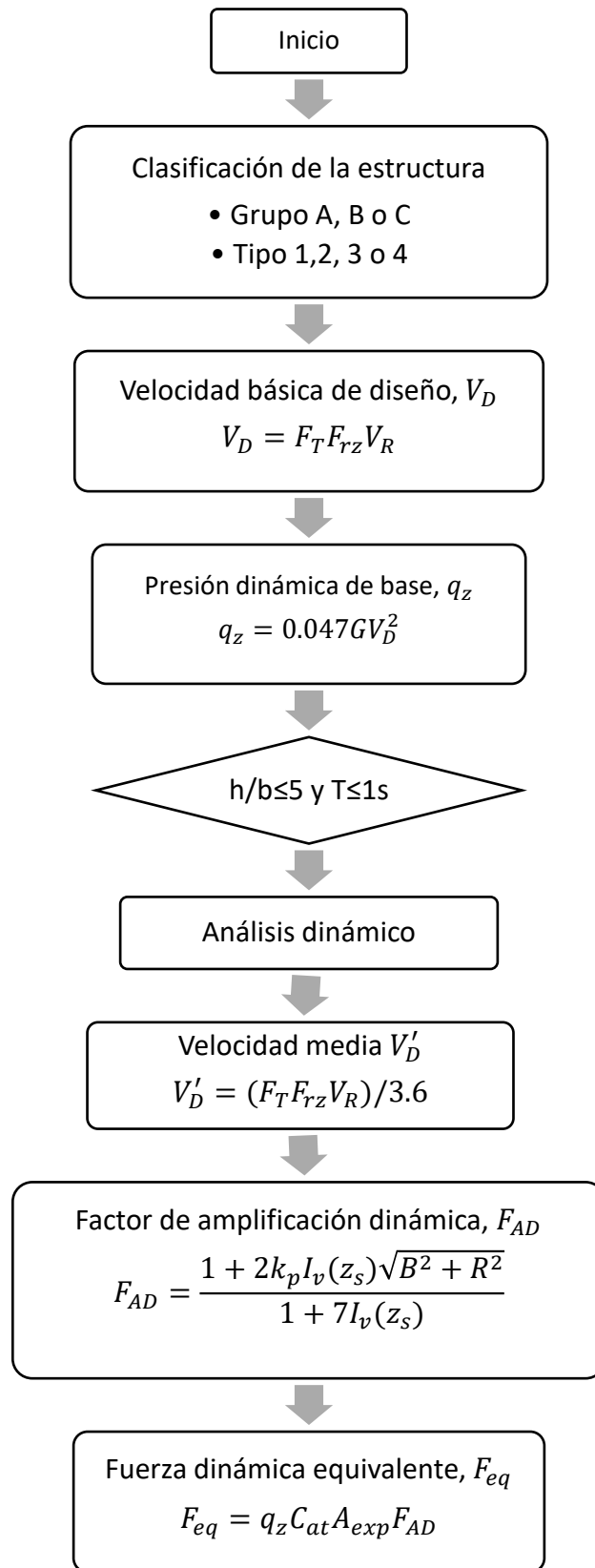


Figura 3.3. Diagrama de flujo del procedimiento para el análisis dinámico.

3.2.1 Clasificación de la estructura

3.2.1.1 Clasificación según su importancia

El MDOC-DV (2008) establece tres niveles de importancia para las construcciones civiles. A cada nivel se le asigna una velocidad de diseño correspondiente con el periodo de retorno. Según el nivel de importancia las construcciones se clasifican en los siguientes grupos:

- Grupo A Estructuras con un grado de seguridad elevado. Aquéllas cuya falla cause la pérdida de un número importante de vidas, o perjuicios económicos o culturales excepcionalmente altos.
- Grupo B Estructuras con un grado de seguridad moderado. Aquéllas que, al fallar, generan baja pérdida de vidas humanas y que ocasionan daños materiales de magnitud intermedia.
- Grupo C Estructuras para las que se recomienda un grado de seguridad bajo. Aquéllas cuya falla no implica graves consecuencias, ni causa daños a construcciones de los Grupos A y B.

3.2.1.2 Clasificación según su respuesta ante la acción del viento

Por su comportamiento estructural ante los efectos dinámicos del viento, las construcciones se clasifican en cuatro tipos. Una vez establecida su clasificación, se selecciona el método para estimar las cargas de diseño provocadas por el viento.

- Tipo 1 Estructuras poco sensibles a las ráfagas y a los efectos dinámicos del viento. Aquéllas de relación de esbeltez, menor o igual que cinco y periodo natural de vibración del primer modo, menor o igual que un segundo.
Método de análisis: Análisis estático
- Tipo 2 Estructuras sensibles a la turbulencia del viento por su alta relación de esbeltez o dimensiones reducidas en su sección transversal. Su relación de esbeltez es mayor que cinco o periodo fundamental mayor que un segundo.
Método de análisis: Análisis dinámico
- Tipo 3 Estructuras que presentan las características del Tipo 2 y, además, presentan oscilaciones importantes transversales al flujo del viento al generarse vórtices o remolinos periódicos que interactúan con la estructura.
Método de análisis: Análisis dinámico
- Tipo 4 Estructuras que por su forma y dimensiones o por la magnitud de sus periodos de vibración (periodos naturales mayores que un segundo), presentan problemas aerodinámicos inestables.

3.2.2 Velocidad básica de diseño V_D

Una vez que ha sido clasificada la estructura y se ha elegido el procedimiento de análisis, se prosigue a calcular la velocidad básica de diseño. La velocidad básica de diseño V_D (km/h) evalúa cuantitativamente aspectos de la variación de la velocidad del viento con respecto a la altura, efectos locales de topografía y la probabilidad de que cierta velocidad sea excedida. Se calcula con la siguiente expresión:

$$V_D = F_T F_{rz} V_R \quad [3.1]$$

donde:

- F_T factor que depende de la topografía local.
- F_{rz} factor de exposición local, se determina con las ecuaciones [3.2],[3.3] y [3.4].
- V_R velocidad regional de ráfaga correspondiente al sitio de desplante, (km/h).

3.2.3 Factor de topografía F_T

Este factor toma en cuenta el efecto topográfico local del sitio en donde se desplantará la estructura, por ejemplo laderas, cimas o montañas de altura importante que aceleren el flujo del viento.

Tabla 3.3. Valores del factor de topografía.

| Sitios | Ejemplos de topografía local | F_T |
|------------|---|-----------------------------------|
| Protegidos | Valles cerrados | 0.9 |
| Normales | Terreno prácticamente plano: campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menores de 5%. | 1.0 |
| Expuestos | Promontorios: montes, cerros, lomas, cimas, colinas, montañas. | Véanse las ecuaciones del MDOC-DV |
| | Terraplenes: peñascos, acantilados, precipicios, diques, presas. | |

3.2.4 Factor de exposición F_{rz}

El actor de exposición local F_{rz} , establece la variación de la velocidad del viento con la altura, en función de la categoría del terreno. Este factor se obtiene de acuerdo con las expresiones siguientes:

$$F_{rz} = c \quad \text{si } z \leq 10 \quad [3.2]$$

$$F_{rz} = c \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \quad \text{si } 10 < z < \delta \quad [3.3]$$

$$F_{rz} = c \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \quad \text{si } z \geq \delta \quad [3.4]$$

donde:

- z altura sobre el terreno a la cual se desea conocer la velocidad de diseño, (m).
- α exponente de la forma de variación del viento con la altura.
- δ altura sobre el nivel del terreno de desplante, donde la variación de la velocidad del viento puede suponerse constante, (m).
- c coeficiente de escala de rugosidad.

Tabla 3.4. Valores recomendados para α , δ y c .

| Categoría del terreno | α | δ (m) | c |
|--|----------|--------------|-------|
| 1 Terreno abierto prácticamente plano, sin obstrucciones y superficies de agua. | 0.099 | 245 | 1.137 |
| 2 Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones. | 0.128 | 315 | 1.000 |
| 3 Terreno cubierto con numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas. | 0.156 | 390 | 0.881 |
| 4 Terreno con numerosas obstrucciones, largas, altas y estrechamente espaciadas. | 0.170 | 455 | 0.815 |

3.2.5 Velocidad regional V_R

La velocidad regional de ráfaga del viento V_R , es la velocidad máxima que puede ser excedida en un cierto periodo de retorno T , en años, en una zona o región determinada del país. La velocidad regional se determina tomando en cuenta la localización geográfica del sitio de desplante y la importancia de la estructura, que a su vez está relacionada con el periodo de retorno. Las velocidades regionales recomendadas en el MDOC-DV (2008) provienen de un análisis estadístico riguroso de registros de las velocidades del viento que se tienen en las estaciones meteorológicas del país. La Figura 3.4 muestra el mapa de isotacas para un periodo de retorno de 200 años.

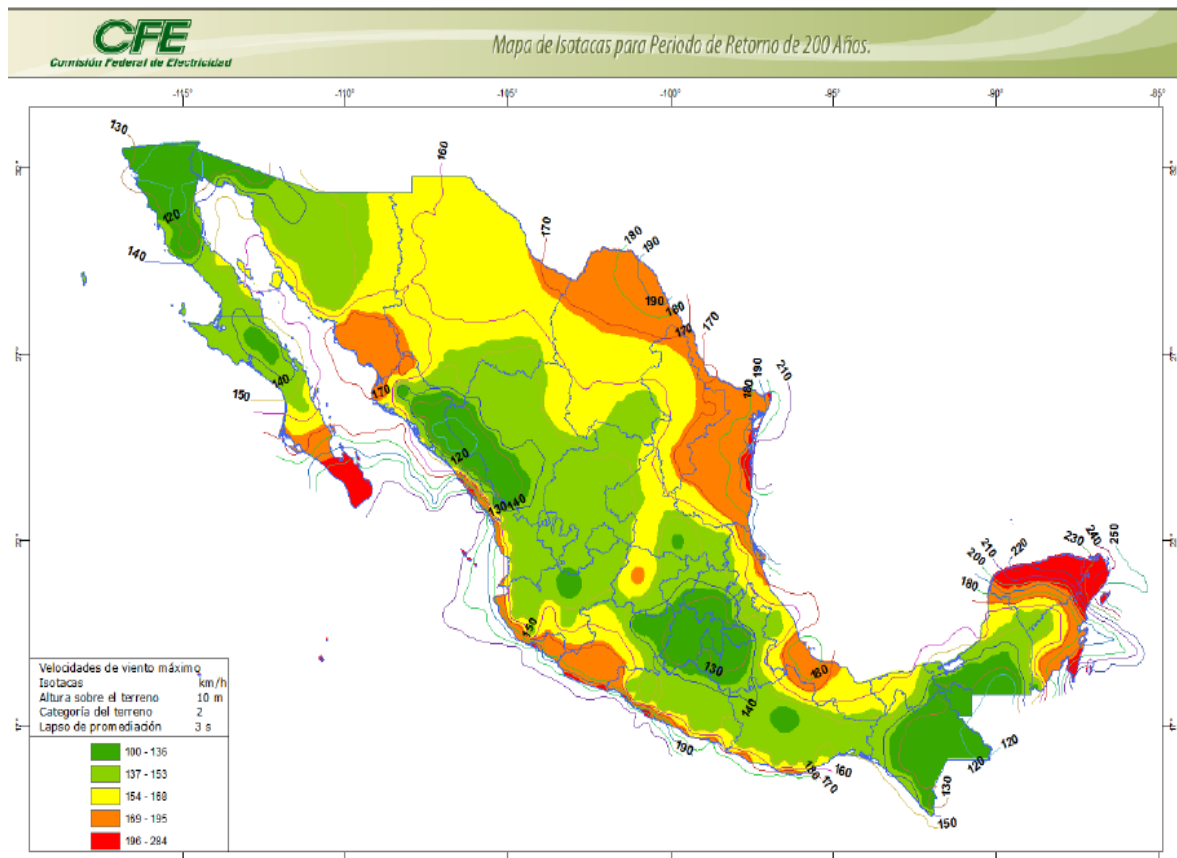


Figura 3.4. Mapa de isotacas para un periodo de retorno de 200 años.

3.2.6 Presión dinámica de base q_z

La siguiente expresión a utilizar es la presión dinámica de base q_z . Cuando el viento actúa sobre una construcción, genera presiones sobre las superficies que varían con la intensidad de la velocidad y la dirección del viento. La presión que ejerce el flujo del viento sobre una superficie plana perpendicular a él se denomina presión dinámica de base y se determina con la siguiente ecuación:

$$q_z = 0.047GV_D^2 \quad [3.5]$$

donde:

- V_D velocidad básica de diseño, (km/h).
- q_z presión dinámica de base a una altura z sobre el nivel del terreno, (Pa).
- G factor de corrección por temperatura y altura.

$$G = \frac{0.392\Omega}{273 + \tau} \quad [3.6]$$

donde:

- Ω presión barométrica, (mm,Hg).
- τ temperatura ambiental, (C°).

3.2.7 Velocidad media V_D'

Para evaluar los efectos de la interacción dinámica entre el flujo del viento y la estructura se debe utilizar la velocidad media de diseño V_D' (m/s). Esta velocidad corresponde a un tiempo de promediación de diez minutos y se aplica para determinar el factor de respuesta dinámica F_{AD} . Esta velocidad se determina con la expresión:

$$V_D' = \frac{F_T F_{r_z}' V_R}{3.6} \quad [3.7]$$

donde:

- V_R velocidad regional de ráfaga, (km/h).
- F_T factor de topografía.
- F_{r_z}' factor de exposición para la velocidad media.

3.2.7.1 Factor de exposición para la velocidad media F'_{rz}

El factor de exposición F'_{rz} considera el efecto combinado de las características de rugosidad local y de la variación de la velocidad con la altura; se define como:

$$F'_{rz} = 0.702\bar{b} \quad \text{si } z \leq 10 \quad [3.8]$$

$$F'_{rz} = 0.702\bar{b} \left(\frac{z}{10}\right)^{\alpha'} \quad \text{si } 10 < z < 200 \quad [3.9]$$

donde:

- z altura sobre la cual se desea calcular la velocidad media del viento, (m).
- \bar{b} coeficiente.
- α' exponente adimensional de la variación de la velocidad con la altura.

Tabla 3.5. Valores de α' y \bar{b} .

| Categoría del terreno | α' | \bar{b} |
|-----------------------|-----------|-----------|
| 1 | 0.12 | 1.17 |
| 2 | 0.16 | 1.00 |
| 3 | 0.21 | 0.77 |
| 4 | 0.29 | 0.55 |

3.2.7.2 Fuerza dinámica equivalente F_{eq} para torres de celosía auto-soportadas

Una vez calculadas todas las expresiones anteriores se puede obtener la fuerza actuante en la estructura. Esta fuerza es producto de la interacción del viento y la respuesta estructural, en una dirección dada considerando la acción dinámica del viento. Esta fuerza de diseño se calcula mediante la expresión:

$$F_{eq} = q_z C_{at} A_{ref} F_{AD} \quad [3.10]$$

donde:

- F_{eq} fuerza dinámica equivalente que actúa paralelamente a la dirección del viento y es variable con la altura, (N).
- q_z presión dinámica de base del viento a la altura z , (Pa).
- C_{at} coeficiente de arrastre.
- A_{ref} área de todos los miembros de la cara frontal, a una altura z , proyectada en un plano vertical perpendicular a la dirección del viento, (m²).
- F_{AD} factor de amplificación dinámica. Se determina con la ecuación [3.11].

3.2.7.3 Coeficiente de presión

En torres de celosía se usan coeficientes de arrastre para obtener la presión total (Tabla 3.6). El coeficiente de arrastre correspondiente a cada tramo de la torre, se obtiene a partir de una interpolación de los valores recomendados de acuerdo con la relación de solidez y la sección transversal de la torre.

Tabla 3.6. Coeficientes de arrastre C_{at} para torres de celosía.

| Relación de solidez ϕ | Torres de sección cuadrada | | Torres de sección triangular equilátera |
|-------------------------------|----------------------------|-------------------|---|
| | Sobre una cara | Sobre una esquina | |
| ≤ 0.1 | 3.5 | 3.9 | 3.1 |
| 0.2 | 2.8 | 3.2 | 2.7 |
| 0.3 | 2.5 | 2.9 | 2.3 |
| 0.4 | 2.1 | 2.6 | 2.1 |
| ≥ 0.5 | 1.8 | 2.3 | 1.9 |

3.2.7.4 Factor de amplificación dinámica para torres de celosía auto-soportadas F_{AD}

El factor de amplificación dinámica F_{AD} proporciona la fuerza máxima producida por los efectos de la turbulencia del viento y las características dinámicas de la estructura. Considera dos contribuciones en la respuesta estructural, la parte cuasi-estática o de fondo y la de resonancia. El F_{AD} para torres de celosía, auto-soportadas se calcula con la expresión:

$$F_{AD} = \frac{1 + 2I_V(z_s)k_p\sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7I_V(z_s)} \left[\frac{C_{RG}}{C_G} \right] F_M \quad [3.11]$$

donde:

- B factor de respuesta de fondo.
- R factor de respuesta en resonancia.
- I_V índice de turbulencia a la altura de referencia z_s .
- k_p factor pico.
- C_{RG}, C_G constantes correctivas de la forma modal.
- F_M factor de corrección de masa.
- z_s altura de referencia, igual a la altura total de la torre, (m).

3.2.7.4.1 Factor de respuesta de fondo

$$B^2 = \frac{1}{1 + 2\frac{\sqrt{hb}}{L(z_s)}} \quad [3.12]$$

donde:

- b ancho promedio, (m).
- h altura de la estructura, (m).
- $L(z_s)$ escala de turbulencia a la altura de referencia z_s .

$$L(z_s) = 300 \left(\frac{z_s}{200} \right)^{\bar{\alpha}} \quad \text{para } z_s \geq z_{min} \quad [3.13]$$

$$L(z_s) = L(z_{min}) \quad \text{para } z_s < z_{min} \quad [3.14]$$

donde:

- z_{min} altura mínima sobre la superficie del terreno para la aplicación del método dinámico, (m).
- $\bar{\alpha}$ exponente para obtener la longitud de escala de turbulencia.

Tabla 3.7. Valores de z_{min} y $\bar{\alpha}$.

| Categoría del terreno | z_{min} (m) | $\bar{\alpha}$ |
|-----------------------|---------------|----------------|
| 1 | 1 | 0.44 |
| 2 | 2 | 0.52 |
| 3 | 5 | 0.61 |
| 4 | 10 | 0.67 |

3.2.7.4.2 Factor de respuesta en resonancia

$$R^2 = \frac{\pi}{4\zeta_{est,x}} S_L(z_s, n_{1,x}) R_h(\eta_h) R_b(\eta_b) \quad [3.15]$$

donde:

$\zeta_{est,x}$ relación de amortiguamiento estructural. Torres de celosía soldadas (=0.003) y torres de celosía atornilladas (=0.005).

$S_L(z_s, n_{1,x})$ densidad de potencia del viento.

$R_h(\eta_h), R_b(\eta_b)$ funciones de admitancia aerodinámica adimensional.

$$S_L(z_s, n_{1,x}) = \frac{4 \left(\frac{n_{1,x} L(z_s)}{V'_D(z_s)} \right)}{\left(1 + 71 \left(\frac{n_{1,x} L(z_s)}{V'_D(z_s)} \right)^2 \right)^{5/6}} \quad [3.16]$$

$$R_h(\eta_h) = \frac{1}{1 + \eta_h} \quad [3.17] \quad \eta_h = \frac{2n_{1,x}h}{V'_D(z_s)} \quad [3.19]$$

$$R_b(\eta_b) = \frac{1}{1 + \eta_b} \quad [3.18] \quad \eta_b = \frac{3.5n_{1,x}b}{V'_D(z_s)} \quad [3.20]$$

donde:

$n_{1,x}$ frecuencia natural en el modo fundamental de vibrar, (Hz).

V'_D velocidad media de diseño del viento, (m/s).

3.2.7.4.3 Factor pico k_p

$$k_p = \sqrt{2 \ln(600v)} + \frac{0.60}{\sqrt{2 \ln(600v)}} \geq 3.0 \quad [3.21]$$

donde:

$$v = n_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \geq 0.08 \quad [3.22]$$

3.2.7.4.4 Constantes correctivas de la forma modal c_{RG} y c_G

$$c_{RG} = \left[\frac{1 - \frac{3}{4} \lambda_B}{\alpha' + 3} \right] \quad [3.23] \quad c_G = \left[\frac{1}{2\alpha' + 3} - \frac{\lambda_B}{2\alpha' + 4} \right] \quad [3.24]$$

donde:

$$\lambda_B = 1 - b_h/b_0 \quad [3.25]$$

- b_h ancho de la estructura de celosía en la parte superior, (m).
- b_0 ancho proyectado de la base de la estructura a nivel del terreno, (m).
- α' exponente de la variación de la velocidad con la altura.
- R factor de respuesta en resonancia.
- B factor de respuesta de fondo.
- $n_{1,x}$ frecuencia natural en el modo fundamental de vibrar, (Hz).
- v la frecuencia de cruces por cero o tasa media de oscilaciones, (Hz).

3.2.7.4.5 Factor de corrección por masa

El factor de corrección por masa es:

$$F_M = \frac{m_{total}}{5m_r} \left[\left(0.5 \frac{b_h}{b_0} - 0.3 \right) (\lambda_m - 2) + 1.4 \right] (1 - 0.4 \ln \lambda_m) \quad [3.26]$$

con:

$$m_r = \int_0^h m(z) [\phi_{1,x}(z)]^2 dz \quad [3.27]$$

donde:

- m_{total} masa total de la estructura, (kg).
- m_r masa generalizada en la dirección longitudinal del viento, (kg).
- λ_m coeficiente de variación de la forma modal con la altura.
- $m(z)$ masa por unidad de longitud de la torre, (kg/m).
- $\phi_{1,x}(z)$ configuración modal del primer modo, en la dirección del viento.

3.2.7.4.6 Índice de turbulencia $I_v(z_s)$

El índice de turbulencia $I_v(z_s)$ representa el nivel o intensidad de ésta en el flujo del viento y donde $z_{\max} = 200\text{m}$.

$$I_v(z_s) = \bar{d} \left(\frac{z_s}{10} \right)^{-\alpha'} \quad z_{\min} \leq z_s \leq z_{\max} \quad [3.28]$$

$$I_v(z_s) = \frac{1}{\ln \left(\frac{z_{\min}}{z_0} \right)} \quad z_s \leq z_{\min} \quad [3.29]$$

3.2.8 Fuerza dinámica equivalente en accesorios

Los coeficientes de arrastre definidos en la Tabla 3.6 corresponden al valor que se asigna considerando únicamente la celosía. Sin embargo, cuando se tienen accesorios sobre las caras de la torre se debe añadir el área de los mismos, ya que sobre ellos también actúa el viento. Esto se logra agregando el área de los accesorios al área proyectada de la torre y se modifica el coeficiente de arrastre, quedando como:

$$C_{ate} = C_{at} + \sum \Delta C_{at} \quad [3.30]$$

donde:

C_{at} coeficiente de arrastre para la torre sin accesorios.

ΔC_{at} coeficiente de arrastre debido a accesorios. Se calcula como:

$$\Delta C_{at} = C_{au} K_{re} K_{in} (A_a / A_{At}) \quad [3.31]$$

donde:

C_{au} coeficiente de arrastre para accesorio aislado.

K_{re} factor de corrección por relación de esbeltez.

K_{in} factor de corrección por interferencia. Donde:

Para accesorios localizados en la cara de la torre cuadrada

$$K_{in} = [1.5 + 0.5 \cos 2(\theta_a - 90^\circ)] \exp[-1.2(C_{at} \phi)^2] \quad [3.32]$$

Para accesorios localizados en la cara de la torre triangular

$$K_{in} = [1.5 + 0.5 \cos 2(\theta_a - 90^\circ)] \exp[-1.8(C_{at} \phi)^2] \quad [3.33]$$

donde:

ϕ relación de esbeltez.

θ_a ángulo de desviación del flujo del viento.

A_a área de cualquier accesorio ubicado el tramo considerado.

A_{At} área proyectada de la torre en el tramo considerado sin accesorios, (m^2).

3.2.9 Fuerza en antenas

Las fuerzas de viento en antenas requieren de una expresión especial, ya que tienen un área sólida mayor, y por lo tanto generan otro efecto sobre la torre. Las fuerzas sobre antenas microondas tipo tambor se describen con respecto al eje de la antena teniendo como origen el vértice de la misma. El viento genera una fuerza axial F_{am} que actúa a lo largo del eje de la antena, una fuerza lateral F_{sm} que actúa perpendicularmente al eje de la antena, y un momento M_m , como se muestra en la figura 3.5. A cada ángulo de incidencia corresponde un valor del coeficiente de arrastre (Tabla 3.8) que determinará el valor de la fuerza.

$$F_{am} = q_z G_h C_a A_a \quad [3.34]$$

$$F_{sm} = q_z G_h C_s A_a \quad [3.35]$$

$$M_m = q_z G_h C_m A_a D_1 \quad [3.36]$$

donde:

- q_z presión dinámica de base, en Pa.
- G_h factor de respuesta dinámica, igual al F_{AD}
- C_a, C_s, C_m coeficiente de arrastre, por tipo de antena y ángulo de inclinación.
- A_a área expuesta de la antena de microondas, en m^2 .
- D_1 diámetro de la antena de microondas, en m.

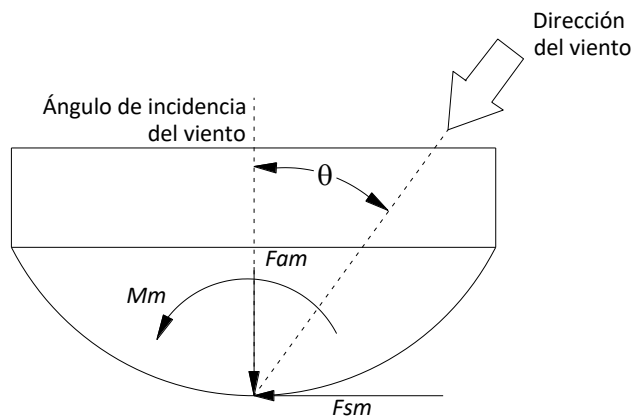


Figura 3.5. Antena tipo tambor y dirección del viento.

Tabla 3.8. Coeficientes de arrastre para antenas microondas tipo tambor obtenidos del MDOC-DV 2008.

| Ángulo de incidencia del viento (grados) | Ca | Cs | Cm |
|--|---------|---------|---------|
| 0 | 1.2617 | 0.0000 | 0.0000 |
| 10 | 1.2617 | 0.0977 | -0.0281 |
| 20 | 1.2500 | 0.1758 | -0.0453 |
| 30 | 1.2109 | 0.2344 | -0.0520 |
| 40 | 1.1563 | 0.2813 | -0.0488 |
| 50 | 1.0859 | 0.3047 | -0.0324 |
| 60 | 0.9453 | 0.3672 | -0.0086 |
| 70 | 0.6719 | 0.4766 | 0.0227 |
| 80 | 0.2734 | 0.5820 | 0.0695 |
| 90 | -0.1094 | 0.6250 | 0.0980 |
| 100 | -0.3438 | 0.6016 | 0.1125 |
| 110 | -0.5391 | 0.5313 | 0.1141 |
| 120 | -0.7109 | 0.4375 | 0.1039 |
| 130 | -0.8594 | 0.3125 | 0.0926 |
| 140 | -0.9336 | 0.2305 | 0.0777 |
| 150 | -0.9570 | 0.1758 | 0.0617 |
| 160 | -0.9727 | 0.1484 | 0.0438 |
| 170 | -0.9961 | 0.0977 | 0.0230 |
| 180 | -1.0156 | 0.0000 | 0.0000 |
| 190 | -0.9961 | -0.0977 | -0.0230 |
| 200 | -0.9727 | -0.1484 | -0.0438 |
| 210 | -0.9570 | -0.1758 | -0.0617 |
| 220 | -0.9336 | -0.2305 | -0.0777 |
| 230 | -0.8594 | -0.3125 | -0.0926 |
| 240 | -0.7109 | -0.4375 | -0.1039 |
| 250 | -0.5391 | -0.5313 | -0.1137 |
| 260 | -0.3438 | -0.6016 | -0.1125 |
| 270 | -0.1094 | -0.6250 | -0.0980 |
| 280 | 0.2734 | -0.5820 | -0.0695 |
| 290 | 0.6719 | -0.4766 | -0.0227 |
| 300 | 0.9453 | -0.3672 | 0.0086 |
| 310 | 1.0859 | -0.3047 | 0.0324 |
| 320 | 1.1563 | -0.2813 | 0.0488 |
| 330 | 1.2109 | -0.2344 | 0.0520 |
| 340 | 1.2500 | -0.1758 | 0.0453 |
| 350 | 1.2617 | -0.0977 | 0.0281 |

3.3 Modelación

Una vez calculadas las fuerzas dinámicas equivalentes, se modelaron las torres en el programa computacional SAP 2000, versión 14, como armaduras espaciales.

Los componentes de la armadura fueron modelados como elementos barra con dos nodos extremos. Los elementos de las columnas se consideraron continuos desde la base hasta la parte superior y sus condiciones de apoyo se definieron como simplemente apoyadas. A los elementos diagonales y transversales, tanto primarios como secundarios, se les asignaron articulaciones tal como si fuera una torre atornillada.

A cada elemento se le asignó una sección estructural correspondiente a lo señalado en las Figuras 3.1 y 3.2. El acero asignado es $F_y = 3\,515 \text{ kg/cm}^2$ con un peso de $W = 7\,849 \text{ kg/m}^3$, módulo de elasticidad $E = 20.38 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ y módulo de cortante $G = 7.842 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$.

3.3.1 Modelación de las cargas

El peso de los accesorios en la torre tal como la cama guía con sus cables, la escalera y las antenas se modelaron como fuerzas verticales que se incluyeron en el patrón de carga muerta. Así el peso de estos accesorios se sumaría al peso de la estructura principal de la torre.

Finalmente, las fuerzas del viento F_{eq} , obtenidas a través del análisis dinámico previamente descrito, se simularon en el modelo como fuerzas horizontales aplicadas en los nodos del panel correspondiente en la dirección Y, como se muestra en la Figura 3.5.

3.3.2 Combinaciones de carga

Las combinaciones de carga utilizadas para la revisión por esfuerzos, son las establecidas en la norma ANSI/TIA-222-G. Estas combinaciones involucran cargas inducidas por cables, hielo y temperatura. En nuestro estudio estas cargas se despreciaron por ser una torre aislada y porque el tema de interés son únicamente las cargas del viento. La norma ANSI/TIA-222-G propone que las estructuras deben estar diseñadas para que las fuerzas de diseño sean igualadas o excedidas en las siguientes condiciones de estado límite:

| | |
|---------------|------------------|
| Combinación 1 | $1.2D + 1.6 W_o$ |
| Combinación 2 | $0.9D + 1.6 W_o$ |

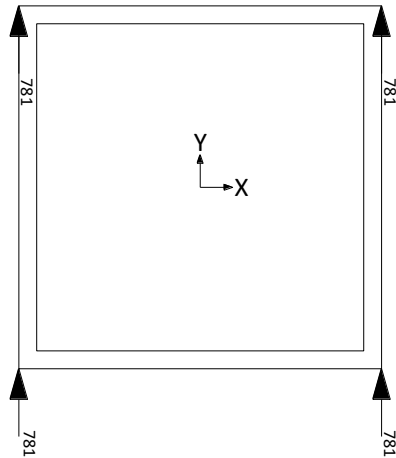
donde: D es la carga muerta de la estructura y W_0 es la fuerza del viento.

q_z presión dinámica de base, en Pa.

G_h factor de respuesta dinámica, igual al F_{AD} .

C_a, C_s, C_m coeficiente de arrastre, por tipo de antena y ángulo de inclinación.

a)



b)

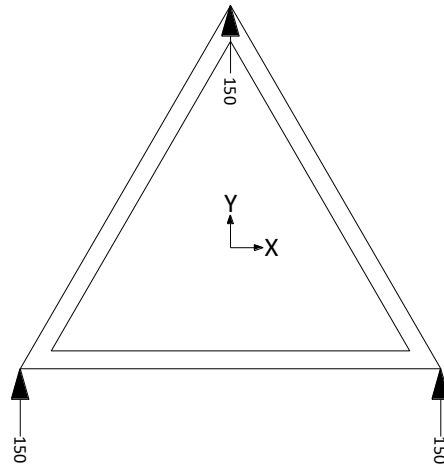


Figura 3.6. Fuerzas en las torres a) sección transversal cuadrada b) sección transversal triangular en N.

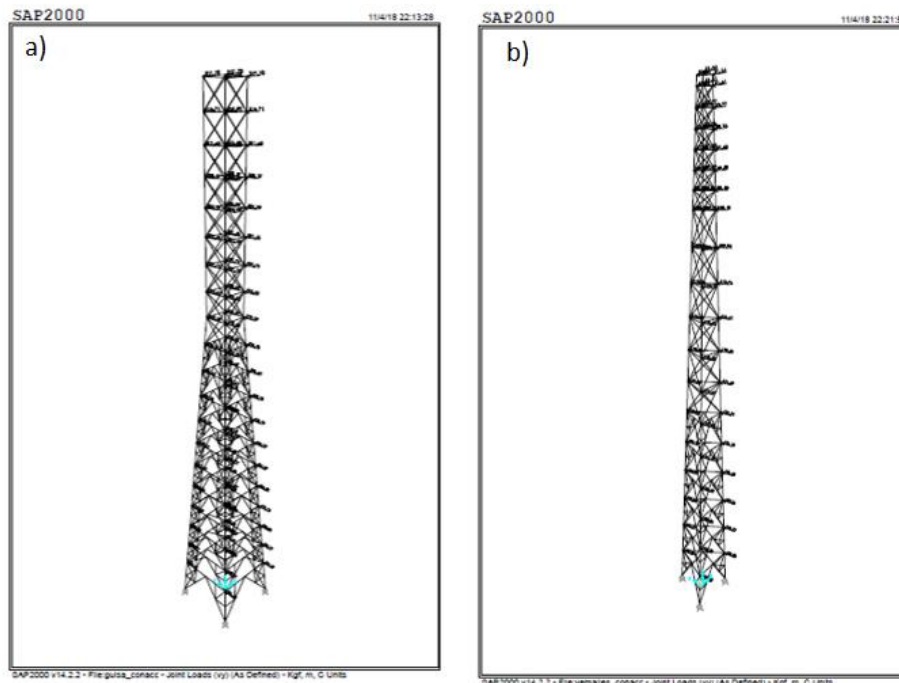


Figura 3.7. Distribución de fuerzas en las torres a) sección transversal cuadrada b) sección transversal triangular.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Resultados del Procedimiento

En este capítulo se presentan los resultados del procedimiento detallado anteriormente. Algunas expresiones varían con respecto a la altura a la cual se desea evaluar el viento, por ejemplo, la velocidad de diseño, la presión dinámica de base y la presión actuante en la estructura. Por practicidad, a continuación, se muestran únicamente los resultados de cada expresión evaluada en el primer tramo de cada torre. Más adelante se encuentran las tablas con los resultados para cada tramo correspondiente.

4.1.1 Clasificación de la estructura

4.1.1.1 Clasificación según su importancia

Las torres de telecomunicaciones son estructuras con un grado de seguridad elevado, por lo tanto, pertenecen a las estructuras del Grupo A y su periodo de retorno es de 200 años (Tabla 4.1).

4.1.1.2 Clasificación según su respuesta ante la acción del viento

La relación de esbeltez de ambos modelos es mayor a 5 ($\lambda=h/b > 5$) y ambos tienen un periodo fundamental de vibrar mayor a 1 segundo ($T > 1s$), por lo que se clasifican como estructuras Tipo 2 y se diseñan de acuerdo con el análisis dinámico (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Clasificación de la estructura.

| Modelo | Según su importancia (Grupo) | Según su respuesta ante la acción del viento (Tipo) | Periodo de retorno (T_r) |
|------------------|------------------------------|---|------------------------------|
| Torre cuadrada | A | 2 | 200 años |
| Torre triangular | A | 2 | 200 años |

4.1.2 Velocidad básica de diseño V_D

La velocidad básica de diseño V_D se calculó con la expresión 3.1 y con datos correspondientes a un periodo de retorno de 200 años, una topografía local plana y categoría de terreno 1 y 2 para las torres de Puerto Cortés y Toluca, respectivamente. Cabe señalar que cada tipo de torre cuenta con un factor de exposición y velocidad regional específico.

Tabla 4.2. Velocidad básica de diseño V_D en el tramo 1.

| | Modelo | |
|---|---------------------|---------------------|
| | Torre cuadrada | Torre triangular |
| Topografía local | Prácticamente plano | Prácticamente plano |
| Factor de topografía F_T | 1.0 | 1.0 |
| Categoría del terreno | Categoría 1 | Categoría 2 |
| Factor de exposición F_{rz} (variable con la altura) | 1.137 | 1.000 |
| Velocidad regional V_R | 170 km/h | 120 km/h |
| Velocidad de diseño V_D (variable con la altura) | 193.29 km/h | 120 km/h |

4.1.3 Presión dinámica de base q_z

Una vez calculada la V_D , se evaluó la presión dinámica de base q_z de acuerdo con lo establecido en la expresión 3.5. Como la presión dinámica de base depende de V_D que es variable con la altura, así mismo q_z varía en cada tramo de la torre. La Tabla 4.3 contiene los resultados de q_z para el primer tramo. Se observa que la presión en la torre cuadrada es casi 3.5 veces mayor que la presión en la torre triangular.

Tabla 4.3. Presión dinámica de base q_z en el tramo 1.

| | Modelo | |
|--|----------------|------------------|
| | Torre cuadrada | Torre triangular |
| Altura sobre el nivel del mar | 10 m | 2680 m |
| Temperatura ambiental τ | 19.9°C | 13.4°C |
| Presión barométrica Ω | 759.2 mm de Hg | 552.4 mm de Hg |
| Factor de corrección por temperatura y altura G | 1.016 | 0.756 |
| Presión dinámica q_z (variable con la altura) | 1784.18 Pa | 511.71 Pa |

4.1.4 Velocidad media V'_D

La Tabla 4.4 muestra los valores de la velocidad media V'_D para cada torre. A diferencia de la velocidad de diseño, la velocidad media requiere de una única altura de referencia z_s , por lo que ésta velocidad no varía con la altura. Se observa que el valor de V'_D para la torre cuadrada es 1.63 veces mayor que el correspondiente a la torre triangular.

Tabla 4.4. Velocidad media V'_D .

| | Modelo | |
|------------------------------------|----------------|------------------|
| | Torre cuadrada | Torre triangular |
| Velocidad regional de ráfaga V_R | 170 km/h | 120 km/h |
| Factor de topografía F_T | 1.0 | 1.0 |
| Factor de exposición F'_{rZ} | 0.970 | 0.841 |
| Velocidad media V'_D | 45.80 m/s | 28.04 m/s |

4.1.5 Factor de amplificación dinámica F_{AD}

El valor del Factor de Amplificación Dinámica, F_{AD} se calcula con las expresiones 3.11 a la 3.28. En Tabla 4.5 se encuentran los parámetros para el cálculo del F_{AD} . Como se esperaba, los parámetros son distintos debido a la diferencia de geometría. Sin embargo, es interesante señalar que los valores del F_{AD} son muy similares aún con esta diferencia de dimensiones y localización, ya que dentro del cálculo del F_{AD} se incluye la velocidad media que como se señaló anteriormente es muy distinta entre ambos modelos.

Tabla 4.5. Factor de amplificación dinámica F_{AD} .

| | Modelo | |
|---|----------------|------------------|
| | Torre cuadrada | Torre triangular |
| Frecuencia natural $n_{1,x}$ | 1.666 | 1.757 |
| Factor correctivo C_{RG} | 0.1663 | 0.1424 |
| Factor correctivo C_G | 0.1573 | 0.1315 |
| Escala de turbulencia $L(z_s)$ | 147.766 | 113.787 |
| Factor de respuesta de fondo B^2 | 0.8628 | 0.8811 |
| Factor de corrección por masa F_M | 1.257 | 1.516 |
| Factor de respuesta de resonancia R^2 | 1.278 | 0.7026 |
| Factor pico k_p | 3.779 | 3.786 |
| Índice de turbulencia I_V | 0.127 | 0.158 |
| Factor de amplificación dinámica F_{AD} | 1.813 | 1.805 |

4.1.6 Coeficientes de arrastre C_a

Los coeficientes de arrastre varían entre cada tramo dependiendo del área de los elementos estructurales. En la Tabla 4.6 se reportan los coeficientes de arrastre para el primer tramo de cada torre interpolando linealmente de los valores contenidos en la Tabla 3.6.

Tabla 4.6. Coeficientes de arrastre C_a en el tramo 1.

| Tramo | Modelo | |
|----------------------------------|-----------------------|----------------------|
| | Torre cuadrada | Torre triangular |
| | 1 | 1 |
| Área solida A_{at} | 3.184 m ² | 1.434 m ² |
| Área total A_{tot} | 14.517 m ² | 5.942 m ² |
| Relación de solidez ϕ | 0.219 | 0.241 |
| Coeficiente de arrastre C_{at} | 2.622 | 2.535 |

4.1.7 Coeficientes de arrastre en accesorios ΔC_{at}

A los coeficientes de arrastre, C_a , se añadieron los coeficientes de arrastre correspondientes a accesorios ΔC_{at} , resultando en un coeficiente final C_{ate} . La Tabla 4.7 contiene los resultados finales de C_{ate} que se utilizaron para el cálculo de las fuerzas de viento en el primer tramo de cada torre. Además, se muestran los valores del factor de esbeltez y direccionalidad del viento que modifican el coeficiente de arrastre de cada accesorio.

Tabla 4.7. Coeficiente de arrastre por accesorios en el tramo 1.

| | Modelo | | | | | |
|-----------------|----------------|--------|----------|------------------|-------|----------|
| | Torre cuadrada | | | Torre triangular | | |
| | Cables | Cama | Escalera | Cables | Cama | Escalera |
| C_{au} | 1.2 | -1.9 | 1.8 | 1.2 | 1.8 | 1.8 |
| K_{re} | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| K_{in} | 1.344 | 1.344 | 0.672 | 0.51 | 0.51 | 0.893 |
| A_a | 1.053 | 0.427 | 0.427 | 0.705 | 0.292 | 0.292 |
| A_{At} | 3.184 | 3.184 | 3.184 | 1.434 | 1.434 | 1.434 |
| ΔC_{at} | 0.534 | -0.343 | 0.1626 | 0.301 | 0.187 | 0.327 |
| C_{ate} | 2.975 | | | 3.350 | | |

4.1.8 Fuerza dinámica equivalente F_{eq}

El cálculo de las fuerzas se repite para cada tramo. En las Tablas 4.8 y 4.9 se muestran los resultados para cada tramo de la torre triangular y la torre cuadrada, respectivamente.

Es interesante notar como entre cada tramo, los valores de F_{eq} van disminuyendo con la altura. Esta es una observación interesante, ya que es un resultado contrario al que se esperaría de la distribución de un fluido. Por otro lado, los valores de V_D si van en aumento con la altura, imitando la distribución de la capa límite. Esta diferencia en la distribución se atribuye a la disminución del área, que sigue la forma tronco piramidal de las torres. Al tener menor área expuesta, la presión del viento no tiene donde incidir.

Tabla 4.8. Cálculo de fuerzas equivalentes de torre cuadrada.

| Tramo | z media [m] | F'_{rz} | V_D [km/h] | q_z [Pa] | C_{ate} | A_{at} [m ²] | F_{eq} [N] |
|-------|-------------|-----------|--------------|------------|-----------|----------------------------|--------------|
| 1 | 1.550 | 1.137 | 193.290 | 1784.184 | 2.976 | 3.184 | 30652.629 |
| 2 | 4.115 | 1.137 | 193.290 | 1784.184 | 2.738 | 2.341 | 20741.846 |
| 3 | 6.145 | 1.137 | 193.290 | 1784.184 | 2.707 | 2.275 | 19928.586 |
| 4 | 8.175 | 1.137 | 193.290 | 1784.184 | 2.725 | 2.134 | 18818.272 |
| 5 | 10.205 | 1.139 | 193.679 | 1791.367 | 2.721 | 2.025 | 17896.902 |
| 6 | 12.235 | 1.160 | 197.189 | 1856.885 | 2.671 | 1.967 | 17693.978 |
| 7 | 14.270 | 1.178 | 200.215 | 1914.324 | 2.619 | 1.910 | 17366.337 |
| 8 | 16.305 | 1.193 | 202.875 | 1965.527 | 2.642 | 1.753 | 16506.132 |
| 9 | 18.335 | 1.207 | 205.246 | 2011.727 | 2.594 | 1.698 | 16071.332 |
| 10 | 20.365 | 1.220 | 207.391 | 2053.991 | 2.533 | 1.645 | 15518.917 |
| 11 | 22.395 | 1.231 | 209.351 | 2093.001 | 2.454 | 1.593 | 14838.586 |
| 12 | 24.425 | 1.242 | 211.157 | 2129.270 | 2.748 | 1.182 | 12536.451 |
| 13 | 26.350 | 1.251 | 212.749 | 2161.494 | 2.717 | 1.082 | 11525.879 |
| 14 | 28.170 | 1.260 | 214.160 | 2190.268 | 2.717 | 1.082 | 11679.312 |
| 15 | 29.990 | 1.268 | 215.491 | 2217.588 | 2.717 | 1.082 | 11824.991 |
| 16 | 31.810 | 1.275 | 216.752 | 2243.609 | 2.717 | 1.082 | 11963.743 |
| 17 | 33.630 | 1.282 | 217.949 | 2268.462 | 2.717 | 1.082 | 12096.268 |
| 18 | 35.450 | 1.289 | 219.089 | 2292.258 | 2.717 | 1.082 | 12223.160 |
| 19 | 37.270 | 1.295 | 220.178 | 2315.094 | 2.717 | 1.082 | 12344.930 |
| 20 | 39.090 | 1.301 | 221.220 | 2337.053 | 2.717 | 1.082 | 12462.339 |

Tabla 4.9. Cálculo de fuerzas equivalentes de torre triangular.

| Tramo | z media [m] | F'_{rz} | V_D [km/h] | q_z [Pa] | C_{ate} | A_{at} [m ²] | F_{eq} [N] |
|-------|----------------|-----------|-----------------|---------------|-----------|-------------------------------|-----------------|
| 1 | 1.042 | 1.000 | 120.000 | 511.714 | 3.350 | 1.434 | 4438.829 |
| 2 | 3.125 | 1.000 | 120.000 | 511.714 | 3.308 | 1.407 | 4301.808 |
| 3 | 5.208 | 1.000 | 120.000 | 511.714 | 3.216 | 1.382 | 4105.996 |
| 4 | 7.292 | 1.000 | 120.000 | 511.714 | 3.202 | 1.356 | 4012.935 |
| 5 | 9.375 | 1.000 | 120.000 | 511.714 | 3.139 | 1.331 | 3859.451 |
| 6 | 11.458 | 1.018 | 122.109 | 529.859 | 2.887 | 1.414 | 3905.344 |
| 7 | 13.500 | 1.039 | 124.699 | 552.575 | 3.502 | 1.025 | 3580.043 |
| 8 | 15.500 | 1.058 | 126.924 | 572.467 | 3.837 | 0.879 | 3485.180 |
| 9 | 17.500 | 1.074 | 128.911 | 590.532 | 3.753 | 0.857 | 3430.564 |
| 10 | 19.500 | 1.089 | 130.709 | 607.120 | 3.650 | 0.836 | 3346.923 |
| 11 | 21.500 | 1.103 | 132.353 | 622.487 | 3.525 | 0.816 | 3234.297 |
| 12 | 23.500 | 1.116 | 133.868 | 636.824 | 3.378 | 0.797 | 3095.224 |
| 13 | 25.000 | 1.124 | 134.933 | 646.992 | 3.198 | 0.400 | 1495.574 |
| 14 | 26.000 | 1.130 | 135.612 | 653.521 | 3.142 | 0.391 | 1450.039 |
| 15 | 27.000 | 1.136 | 136.268 | 659.865 | 3.076 | 0.382 | 1400.291 |
| 16 | 28.000 | 1.141 | 136.904 | 666.038 | 2.999 | 0.373 | 1346.184 |
| 17 | 29.000 | 1.146 | 137.521 | 672.048 | 2.911 | 0.365 | 1287.589 |
| 18 | 30.000 | 1.151 | 138.119 | 677.906 | 2.809 | 0.356 | 1224.080 |
| 19 | 30.750 | 1.155 | 138.556 | 682.205 | 3.960 | 0.130 | 633.801 |

4.2 Revisión de desplazamientos con base en el incremento de antenas

Con el objeto de conocer el comportamiento de la torre mediante el incremento de antenas, se realizó el siguiente análisis. Primeramente fueron asignadas las fuerzas del viento F_{eq} y posteriormente se añadieron las fuerzas F_{am} correspondientes a las antenas. Con cada incremento se colocaban 3 antenas más en la torre triangular y 4 antenas más para la torre cuadrada, comenzando desde la parte superior y después colocándolas un tramo por debajo de las anteriores. Así fue posible reportar los desplazamientos que se presentaban con cada incremento de antenas y analizar el comportamiento de la estructura.

Para este análisis se utilizaron antenas tipo tambor de 38 kg y 70 cm de diámetro cada una. Ya que el aumento de peso afectaba el comportamiento dinámico de la estructura, se calcularon los valores del F_{AD} y F_{eq} con cada incremento en el número de antenas. La Tabla 4.10 muestra los parámetros obtenidos para cada incremento. Es interesante notar como en ambos modelos el F_{AD} disminuyó con el aumento de peso. Esto se debe a la forma de la expresión 3.26 del factor de corrección por masa F_M . En esta expresión aparece una relación de 1 a 5 entre m_{total} y m_r . Con el aumento de antenas, m_{total} tenía un incremento constante a diferencia de m_r cuyo incremento ascendía y al multiplicarlo por 5 el valor de F_M disminuía.

Tabla 4.10. Parámetros del F_{AD} para cada incremento.

| Torre cuadrada | | | | | |
|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 0 antenas | 4 antenas | 8 antenas | 12 antenas | 16 antenas |
| $n_{1,x}$ | 1.666 | 1.637 | 1.613 | 1.595 | 1.580 |
| λ_m | 2.340 | 2.349 | 2.354 | 2.357 | 2.357 |
| m_r | 2288.265 | 2433.455 | 2551.366 | 2646.325 | 2722.013 |
| m_{total} | 17 726.503 | 17 878.503 | 18 030.503 | 18 182.503 | 18 334.503 |
| F_M | 1.390 | 1.314 | 1.261 | 1.225 | 1.201 |
| F_{AD} | 1.813 | 1.722 | 1.659 | 1.616 | 1.588 |
| Torre triangular | | | | | |
| | 0 antenas | 3 antenas | 6 antenas | 9 antenas | 12 antenas |
| $n_{1,x}$ | 1.756 | 1.684 | 1.626 | 1.579 | 1.541 |
| λ_m | 1.992 | 2.024 | 2.043 | 2.054 | 2.058 |
| m_r | 740.922 | 837.412 | 924.390 | 1 001.670 | 1 069.725 |
| m_{total} | 5 112.593 | 5 226.592 | 5 340.593 | 5 454.593 | 5 568.593 |
| F_M | 1.401 | 1.251 | 1.149 | 1.079 | 1.029 |
| F_{AD} | 1.806 | 1.628 | 1.507 | 1.424 | 1.367 |

La Tabla 4.11 contiene las fuerzas del viento que actúan sobre cada antena colocada a distintas alturas. En cada incremento, estas fuerzas se aplicaban 3 o 4 veces dependiendo del modelo. Cabe señalar, que a diferencia de las fuerzas F_{eq} mostradas en la Tablas 4.8 y 4.9, aquí se observa que las fuerzas debido al viento aumentan con la altura, ya que el área de incidencia se mantuvo constante.

Tabla 4.11. Fuerzas para antenas tipo tambor.

| Torre cuadrada | | |
|---------------------------------------|------------|--------------|
| Área expuesta A_a [m ²] | 0.385 | |
| Coefficiente de arrastre C_a | 1.2617 | |
| Z [m] | q_z [Pa] | F_{am} [N] |
| 40 | 2 348 | 2 067 |
| 38.18 | 2 326 | 2 048 |
| 36.36 | 2 304 | 2 029 |
| 34.54 | 2 280 | 2 008 |
| Torre triangular | | |
| Área expuesta A_a [m ²] | 0.385 | |
| Coefficiente de arrastre C_a | 1.2617 | |
| Z [m] | q_z [Pa] | F_{am} [N] |
| 30.5 | 681 | 597 |
| 29.5 | 675 | 592 |
| 28.5 | 669 | 587 |
| 27.5 | 663 | 581 |

4.3 Análisis de los desplazamientos en la torre cuadrada

La Figura 4.1 muestra los desplazamientos en el extremo superior de la torre cuadrada. Se consideró tomar los datos en la parte más alta, ya que es donde se presentaban los mayores desplazamientos. En la Figura 4.1 se observa que los datos se ajustan a un comportamiento lineal de ecuación igual a $y = 0.0021x + 0.1892$ con un coeficiente de determinación R^2 igual a 0.9992. Por lo tanto si se llegarán a colocar más antenas, el desplazamiento seguiría esta tendencia y sería poco probable que apareciera un desplazamiento drástico. Con esta tendencia podríamos inferir el desplazamiento en caso de que fuera necesario incrementar el número de antenas. La Tabla 4.12 contiene los resultados exactos de los desplazamientos de esta torre. El menor desplazamiento fue de 18.97 cm y el mayor fue de 22.31 cm, una diferencia de 3.34 cm ante la colocación de 16 antenas.

Tabla 4.12. Desplazamientos en la torre cuadrada.

| # Antenas | Desplazamiento (m) |
|-----------|--------------------|
| 0 | 0.1897 |
| 4 | 0.1972 |
| 8 | 0.2057 |
| 12 | 0.2145 |
| 16 | 0.2231 |

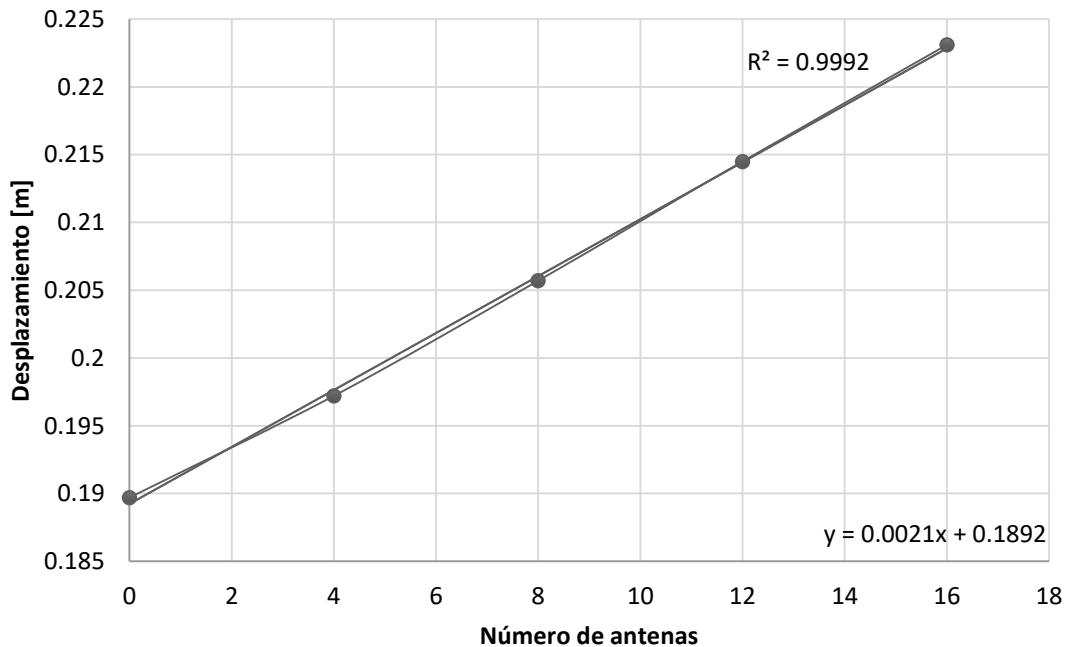


Figura 4.1. Desplazamientos en la torre de sección transversal cuadrada.

4.4 Análisis de los desplazamientos en la torre triangular

La Figura 4.2 muestra los desplazamientos en el extremo superior de la torre triangular. Una vez más se tomaron los datos en la parte más alta de la torre, porque ahí se presentaban los mayores desplazamientos. En esta gráfica se observa que para un ajuste lineal de ecuación igual a $y = 0.0008x + 0.1067$, el coeficiente de determinación R^2 es igual a 0.9248. A pesar de que este ajuste es de menor precisión que el de los datos anteriores, sigue siendo afín al comportamiento lineal. De acuerdo con los datos de la Tabla 4.13, el menor desplazamiento fue de 10.78 cm y el mayor fue de 11.70 cm, una diferencia de 0.92 cm ante la colocación de 12 antenas.

Tabla 4.13. Desplazamientos en la torre triangular.

| # Antenas | Desplazamiento (m) |
|-----------|--------------------|
| 0 | 0.1078 |
| 3 | 0.1086 |
| 6 | 0.1101 |
| 9 | 0.1131 |
| 12 | 0.1170 |

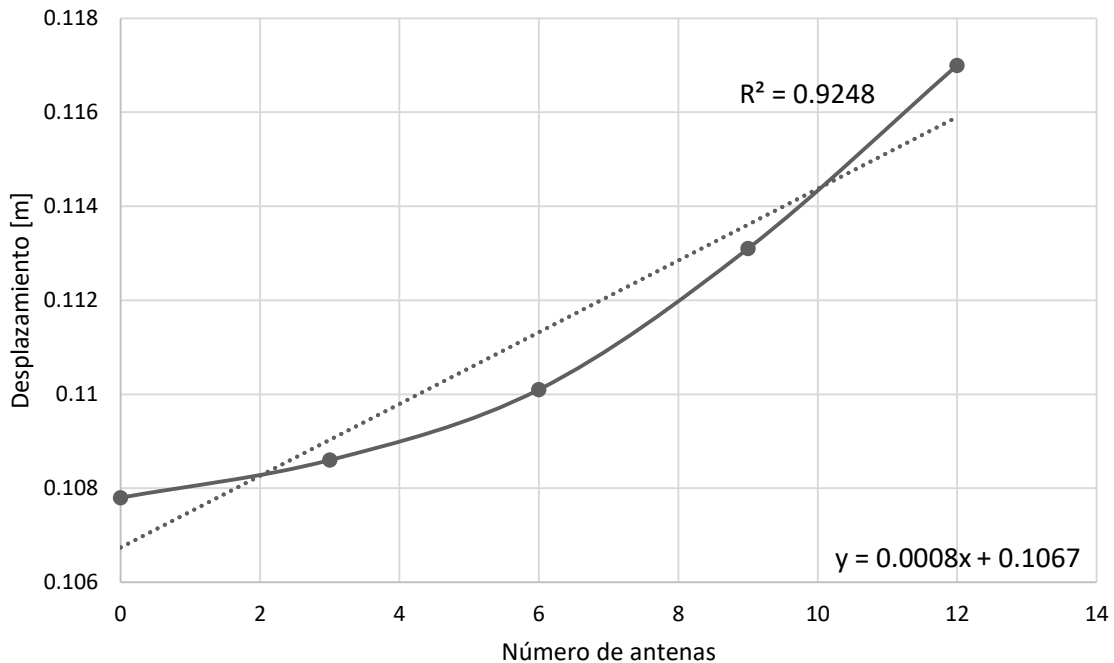


Figura 4.2. Desplazamientos en la torre de sección transversal triangular.

4.5 Estimación del daño normalizado

El análisis de estimación del daño por disminución del área transversal de los elementos, consistió en reducir el porcentaje de esta en los elementos columna y compararlo contra el porcentaje de elementos fallados. Los modelos seleccionados para esta prueba fueron el modelo de torre cuadrada con 4 antenas y el modelo triangular con 3 antenas, todas colocadas en el extremo superior. A cada modelo se le asignó sus respectivas fuerzas de viento F_{eq} junto con las combinaciones de carga mencionadas en el Capítulo 3, en las que influyen las cargas de viento y la carga muerta.

Cada reducción representaba el 10% del área de todas las columnas. Una vez aplicada la reducción, se analizaba el modelo y se cuantificaban los elementos que se encontraban en un estado de esfuerzo mayor al permisible. Con este dato se calculó el daño normalizado, al cual se le denominó como Pd. Este daño es la relación entre el número de elementos fallados y el número total de elementos.

Las Figuras 4.3 y 4.4 muestran el porcentaje de reducción del área en el eje x , y el daño normalizado Pd en el eje y . En ambas graficas se observa el mismo comportamiento, en el que el daño incrementa mientras disminuye el área de las columnas. En el 30% de reducción del área se aprecia un aumento del daño, en el cual se podría considerar que la estructura presenta un colapso. Por lo que sería recomendable que se revisaran los daños que aparecen tanto en el modelo matemático como en la estructura real.

A pesar de que el daño oscila entre 0.5% y 10% en la torre triangular y entre el 2% y 15% en la torre cuadrada, los elementos fallados en su mayoría fueron correspondientes a columnas. Las columnas son el principal soporte de la estructura y en caso de presentarse una falla significaría el colapso total de la torre.

4.6 Daño normalizado en torre cuadrada

La Tabla 4.14 contiene datos más detallados del daño para la torre cuadrada. Esta torre tiene un total de 657 elementos, en la primera reducción 15 elementos fallaron lo que representó el 2.281% del daño normalizado. Los datos se registraron hasta llegar al 70% de reducción, donde fallaron 105 elementos que representaron el 15.98% del daño normalizado. En la Figura 4.3 se observa un comportamiento exponencial de ecuación igual a $y = 1.5133e^{0.0336x}$ con un coeficiente de determinación R^2 igual a 0.9834.

Tabla 4.14. Daño normalizado en la torre cuadrada.

| % Reducción de área | # Elementos fallados | Pd % |
|---------------------|----------------------|---------|
| 10 | 15 | 2.2831 |
| 20 | 17 | 2.5875 |
| 30 | 31 | 4.7184 |
| 40 | 35 | 5.3272 |
| 50 | 51 | 7.7626 |
| 60 | 79 | 12.0244 |
| 70 | 105 | 15.9817 |

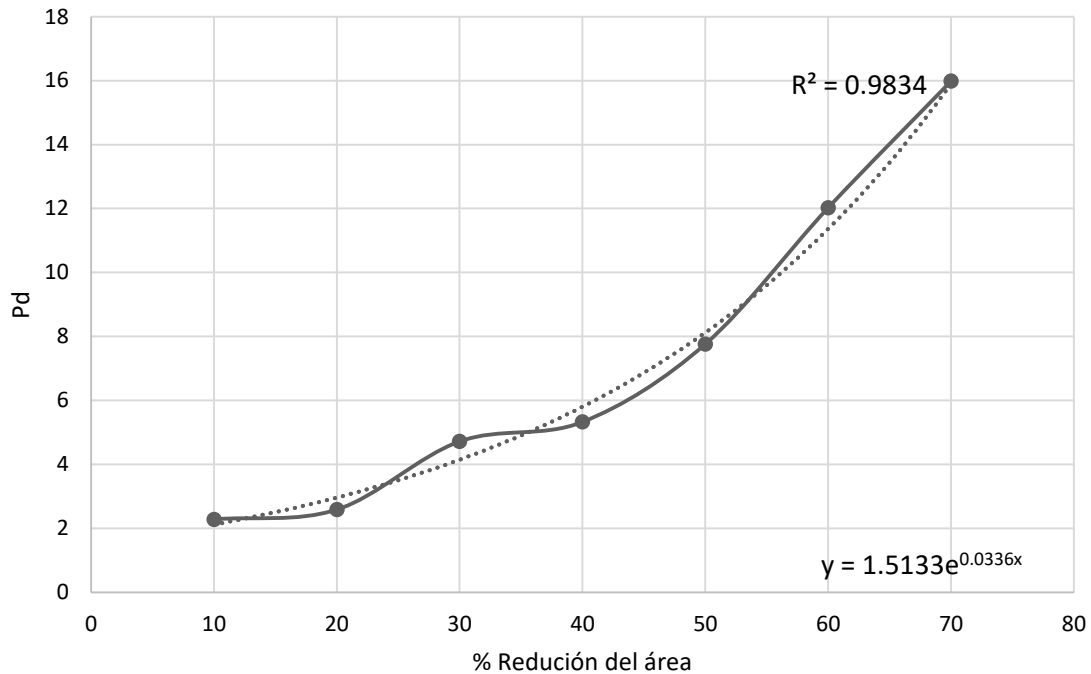


Figura 4.3. Daño normalizado en la torre de sección transversal cuadrada.

4.7 Daño normalizado en torre triangular

La torre triangular cuenta con un total de 342 elementos. De acuerdo con la Tabla 4.15, en la primera reducción fallaron 2 elementos lo que representó el 0.58% del daño normalizado. En la última reducción del 70% del área, fallaron 32 elementos que representó el 9.35% del daño normalizado. En la Figura 4.4 se observa que los datos se ajustan a un comportamiento exponencial de ecuación igual a $y = 0.3068e^{0.0478x}$ con un coeficiente de determinación R^2 igual a 0.9709.

Tabla 4.15. Daño normalizado en la torre triangular.

| % Reducción de área | # Elementos fallados | Pd % |
|---------------------|----------------------|--------|
| 10 | 2 | 0.5848 |
| 20 | 3 | 0.8772 |
| 30 | 3 | 0.8772 |
| 40 | 7 | 2.0468 |
| 50 | 12 | 3.5088 |
| 60 | 19 | 5.5556 |
| 70 | 32 | 9.3567 |

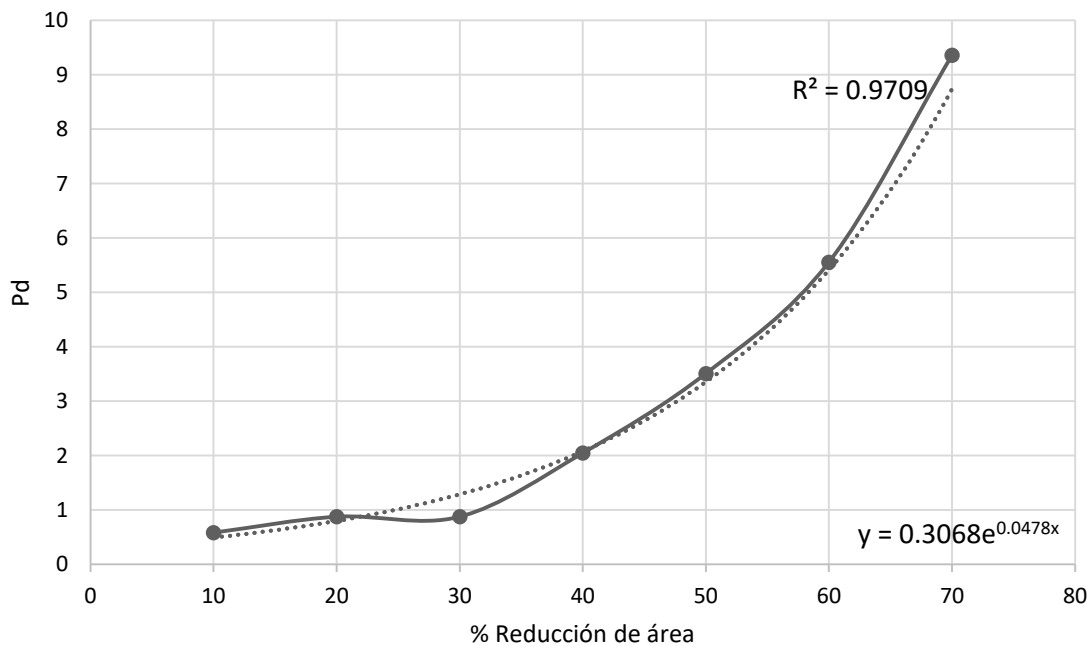


Figura 4.4. Daño normalizado en la torre de sección transversal triangular.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Como se expuso en el Capítulo 1, las torres de telecomunicaciones son de gran importancia dentro de la infraestructura de la telecomunicación y son parte esencial del sistema social y económico actual. Sin embargo, se han identificado varios eventos en los que se ha demostrado que el viento es el fenómeno que más afecta a estas estructuras. Eventos naturales tanto nacionales e internacionales, han puesto en evidencia las fuertes velocidades de viento que las ponen a prueba estructuralmente y en ocasiones provocan su falla. Con el fin de disminuir la cantidad de pérdidas asociadas a estos sucesos, es necesario profundizar en su estudio y análisis para reducir la posibilidad de que sean afectadas.

En la literatura actual se puede encontrar información vasta sobre el diseño por viento en estructuras. Dentro de los códigos y normativas internacionales hay gran variedad de recomendaciones que se basaban en los mismos criterios sobre el comportamiento del viento. No obstante, no todos ellos cuentan con las especificaciones para el diseño de torres de celosía auto-soportadas. En México la normativa más recurrente, el Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento 2008, sí cuenta con las especificaciones que permiten el análisis de este tipo de estructuras. El MDOC-DV (2018) es el resultado de una exhaustiva revisión en materia de investigación y estandarización a nivel internacional.

Es por esto que para el presente estudio se seleccionó el MDOC-DV (2008) como pauta para el procedimiento. El capítulo 3 contiene una descripción detallada de las expresiones y parámetros para poder obtener las fuerzas del viento que actúan sobre la torre. Para este fin, se toman en cuenta características climatológicas y topográficas del lugar, así como las propiedades geométricas y dinámicas de las torres de telecomunicaciones. A diferencia de una construcción prismática, las torres de celosía son estructuras muy esbeltas que pueden presentar grandes oscilaciones. Además no tienen superficies planas por lo que requieren de coeficientes de arrastre.

Tras obtener las fuerzas del viento y aplicarlas sobre modelos computacionales en el programa SAP2000 v14, se hicieron análisis de desplazamiento por colocación de antenas y se obtuvo el daño normalizado por reducción de área. Lo resultados llevaron a las siguientes conclusiones:

5.1.1 Desplazamiento por incremento de antenas

Los desplazamientos que se obtuvieron están entre los 18 y 23 cm para la torre cuadrada, y entre los 10 y 12 cm para la torre triangular. De acuerdo con el ANSI/TIA-222-G, los desplazamientos horizontales bajo condiciones de servicio no deben exceder el 5% de la altura de la estructura. Es decir, para la torre cuadrada no debería exceder los 2 m y la torre triangular los 1.55 m. Ninguno de los modelos alcanzó a rebasar el 1% de estos valores, por lo tanto ambos están dentro de la norma.

Se puede concluir que la colocación de este tipo de antenas, microondas tipo tambor, no representa un incremento importante en los desplazamientos. Sin embargo la localización de la estructura, que influye en el cálculo de la velocidad de diseño y las fuerzas del viento, es lo que realmente tiene un gran peso dentro del diseño.

5.1.2 Daño normalizado

Los análisis del daño normalizado en ambos modelos, resultaron con el mismo comportamiento en sus gráficas. Es un resultado interesante, ya que son de geometrías y localización totalmente distintas. Sería interesante añadir a este análisis un nuevo modelo, distinto a los ya estudiados, para poder generalizar este comportamiento en las torres de celosía.

La representación de reducción del área en un escenario real, podría presentarse debido a la corrosión del material o un posible desprendimiento de algún elemento. De acuerdo con los resultados de este trabajo, se podría inferir que a partir de una reducción del área del 30% de los elementos columna, habría la posibilidad de presentarse un colapso. Los análisis de este estudio fueron realizados con un modelo numérico en SAP 2000 v14, que permite conocer el probable daño en la estructura. Esto da una pauta de los elementos que se deberían observar en caso de que se realice una revisión física de la estructura.

5.2 Recomendaciones

- Realizar el cálculo de las expresiones para obtener las fuerzas del viento con detención en cada expresión y parámetro. En especial en los valores del factor de topografía, factor de exposición y el Factor de Amplificación Dinámica en los que influyen varios coeficientes y características especiales.
- Existen modelos de torres de telecomunicaciones diseñados particularmente para ciertos lugares. Los modelos de torres más rígidas generalmente se ubican en sitios donde aparecen fuertes velocidades de viento. Es recomendable que no se cambie una estructura a otra localidad sin haber hecho una revisión previa.
- Las acciones de mantenimiento y revisión constante en estructuras de acero es primordial. Las torres de telecomunicaciones están expuestas a la intemperie, lo que podría provocar la corrosión del acero con el que están hechas. La corrosión de los elementos o de las uniones entre estos podría generar un problema grave.
- El MDOC-DV (2008) contiene algunas recomendaciones para obtener una aproximación del modo de vibrar de torres de celosía. Sin embargo, se sugiere comparar este valor mediante el uso de programas computacionales como SAP2000.
- La tecnología es una herramienta que facilita mucho el cálculo para el análisis de estructuras. No obstante, el calculista debe de ser cauto con los resultados obtenidos y verificar que sean congruentes con la realidad.

REFERENCIAS

AIJ-RLB (1993), **“Recommendations on Loads for Buildings”**. Architectural Institute of Japan
ASCE. (2003). **“Minimum design loads for buildings and other structures”**. ASCE 7, Reston, VA.

Computers & Structures Inc. (1995) **“Computer program SAP 2000”**. Version 14.2.2. Berkeley California.

Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos Subdirección de Estudios Económicos y Sociales. (2016) **“Impacto Socioeconómico de los principales Desastres ocurridos en la República Mexicana en 2014”**. CENAPRED, México.

Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos Subdirección de Estudios Económicos y Sociales. (2017) **“Impacto Socioeconómico de los principales Desastres ocurridos en la República Mexicana en 2015”**. CENAPRED, México.

Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos Subdirección de Estudios Económicos y Sociales. (2018) **“Impacto Socioeconómico de los principales Desastres ocurridos en la República Mexicana en 2016”**. CENAPRED, México.

EC-1 (2005). **“Eurocodigo 1-Parte 1-4: Acciones en estructuras- Acciones del viento”**. UNE-ENV 1991-2-4.

Gonzales J. (17 de diciembre 2017) **“Telecomunicaciones en la era después de María”**. El Nuevo Día. Recuperado de <https://www.elnuevodia.com/tecnologia/tecnologia/nota/telecomunicacionesenlaeradespuesdemaria-2382866/>

Hernández H, Rangel A, López A, (2010), **“Respuesta dinámica de torres de telecomunicación ante cargas eólicas en México”**. XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, León Guanajuato 2010.

Holmes JD. (2003) **“Wind loading of structures”**. CR Press, Taylor & Francis, Boca Raton

Loredo-Souza, A.M. (1998) **“The effects of wind on transmission lines”**. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brazil.

Madugula, M. K. S. (2002), **“Dynamic Response of Lattice Tower and Guyed Mast”**. Virginia, USA: Ed. ASCE.

MDOC-DV (2008) **“Manual de diseño de obras civiles. Diseño por viento”**. Comisión Federal de Electricidad, México.

Murià-Vila D, Jaimes MA, Pozos-Estrada A, López A, Reinoso E, Chávez MM, Peña F, Sánchez-Sesma J, López O (2018) **“Effects of hurricane Odile on the infrastructure of Baja California Sur, Mexico”**. Nat Hazards 91(3):963–981pp.

NOAA (1999). United States. Screening Quick Reference Tables. National Oceanic and Atmospheric Administration. Recuperado de <http://response.restoration.noaa.gov/cpr/sediment/squirt/squirt.html>

Parnás E. **“Fallas estructurales en torres reticuladas para telecomunicaciones”**. Habana, Cuba 2008.

ANEXO: MODELACIÓN DE TORRES DE CELOSÍA EN SAP 2000

En la actualidad, el uso de programas computacionales para análisis y diseño de estructuras es fundamental dentro de la ingeniería civil. Uno de los programas con mayor uso es SAP 2000, el cual es un software de métodos analíticos basado en elemento finito (Computers & Structures, Inc., 1995). SAP 2000 permite crear modelos gráficos 3D de estructuras y asignar cargas para después obtener las respuestas estructurales. En este anexo se muestra un ejemplo para generación y análisis de un modelo computacional de torre de celosía en SAP 2000.

1. Geometría

Se abre el programa SAP 2000 y se da clic en nuevo modelo (Figura A.1) o se tecldea Ctrl+N. Aparecerá la ventana New Model en donde se seleccionan las unidades del modelo. En este caso se eligieron Kgf, m, C (Figura A.2).

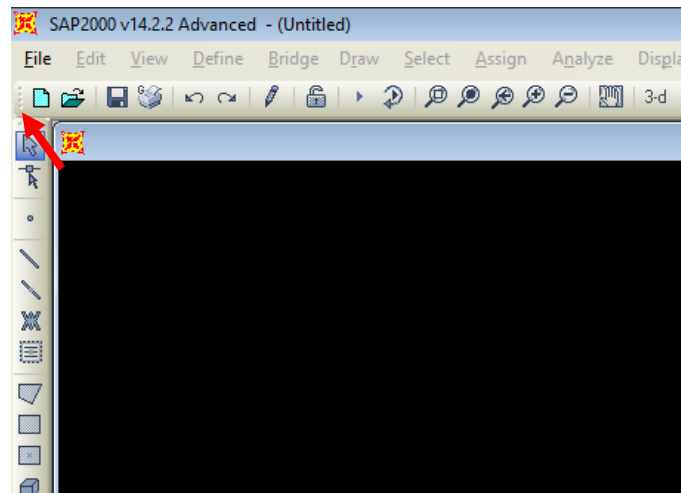


Figura A.1 Nuevo modelo.

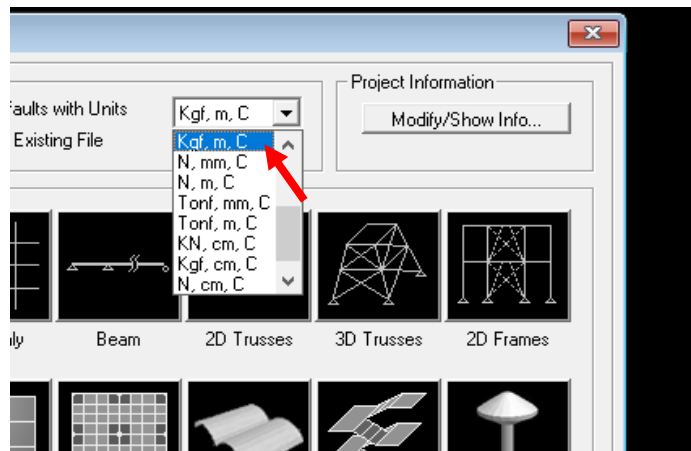


Figura A.2 Selección de unidades.

Para comenzar a generar el modelo, en la ventana New Model (Figura A.2) se elige la plantilla 3D trusses. En la ventana 3D trusses (Figura A.3) se muestran algunos modelos predeterminados de torres de celosía. Para este ejemplo se eligió trabajar con una torre de transmisión tipo 2, Transmission Tower 2.

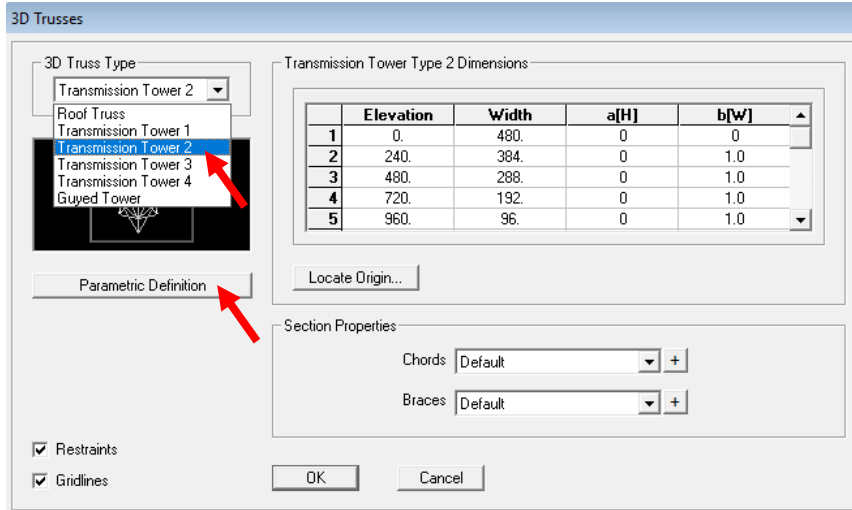


Figura A.3. Modelos predeterminados de torres de celosía.

En el botón Parametric Definition (Figura A.4), se encuentran las vistas en elevación, planta y espaciamento de las diagonales. Una vez identificados los parámetros, se modifica la geometría de la torre desde la ventana de 3D trusses (Figura A.3), se da clic en Ok y aparecerá el modelo (Figura A.5).

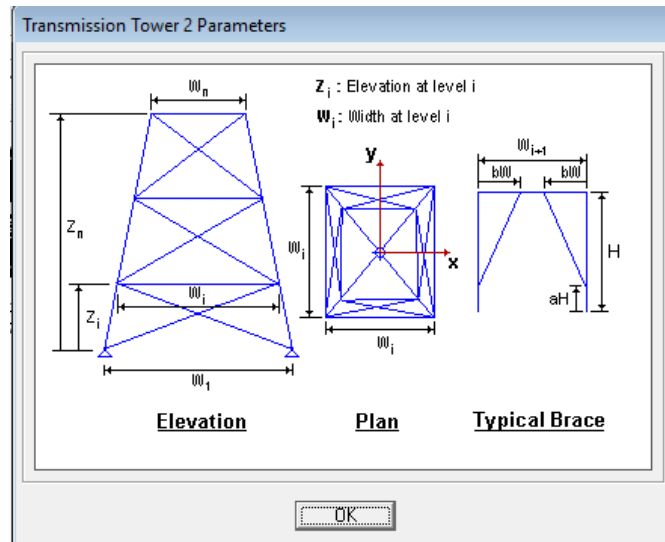


Figura A.4 Definiciones paramétricas.

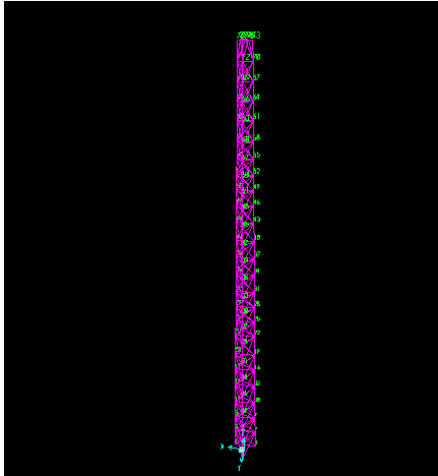


Figura A.5 Generación del modelo.

2. Secciones estructurales

El modelo generado tiene asignadas secciones estructurales predeterminadas por el programa. Para asignar las secciones deseadas, se da clic en la pestaña Define > Section Properties > Frame sections (Figura A.6). Aparecerá la ventana Frame Properties y se da clic en Add New Property (Figura A.7).

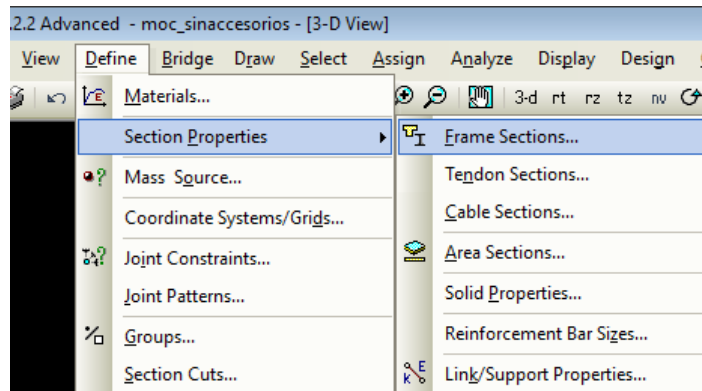


Figura A.6. Secciones de armadura.

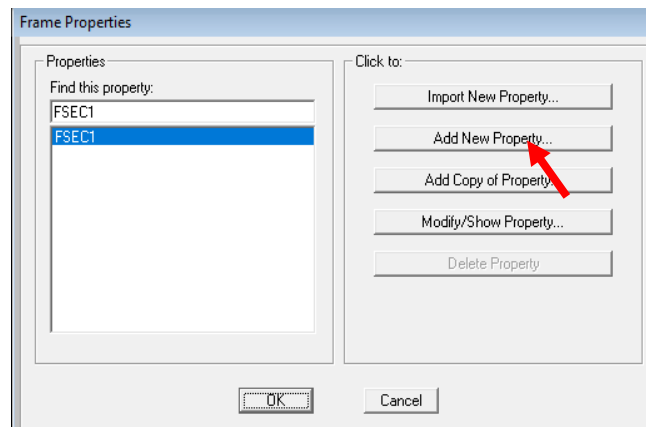


Figura A.7. Añadir nueva propiedad.

En la ventana Add Frame Section Property (Figura A.8), se selecciona el material y la sección transversal de la sección, para este ejemplo se utilizó ángulos de acero. En la ventana Angle Section (Figura A.9), se modifica el nombre y las medidas horizontales y verticales de la sección transversal deseada. De esta manera se pueden generar la cantidad de secciones que se necesiten.

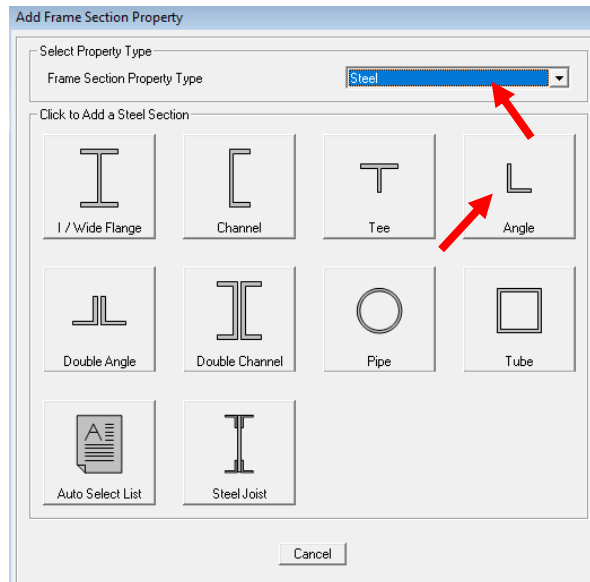


Figura A.8. Añadir nueva propiedad de armadura.

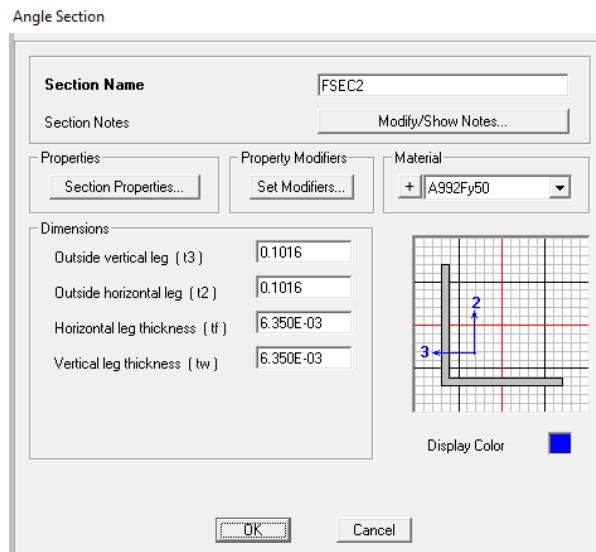


Figura A.9. Sección del ángulo.

Una vez definidas las secciones, se seleccionan los elementos a las que se le quiere asignar cierta sección (Figura A.10). Se da clic en la pestaña Assign > Frame > Frame Section, se elige alguna de las secciones creadas anteriormente y se da clic en Ok.

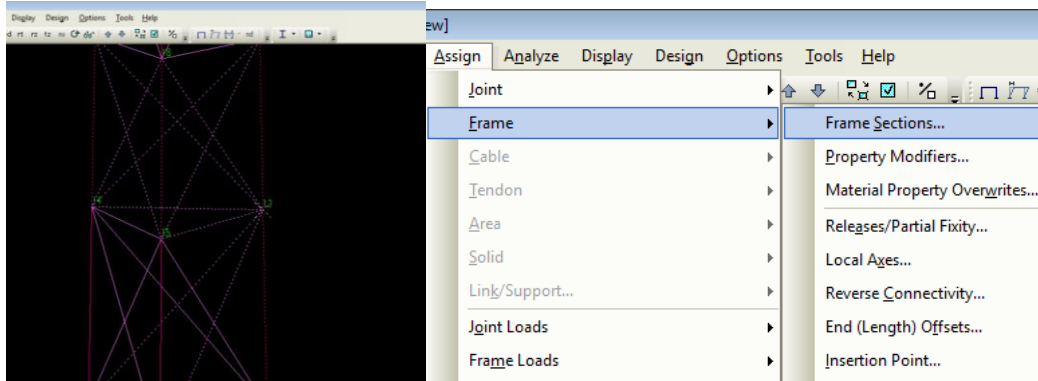


Figura A.10. Asignar sección transversal.

3. Cargas

Las fuerzas a las que estará sometida la estructura se definen en la pestaña Define > Load Patterns. En la ventana Define Load Patterns (Figura 12) se nombra la carga y se selecciona el tipo, en este caso se eligió viento, y se da clic en Add New Load Pattern. Así se pueden definir todas las cargas necesarias y se da clic en Ok.

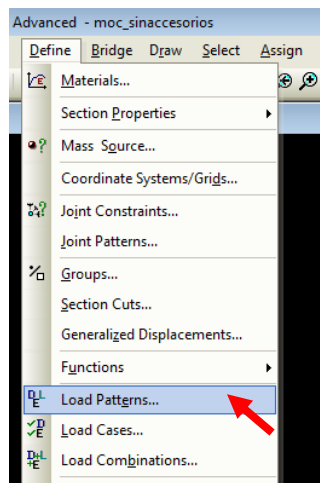


Figura A.11. Patrones de carga.

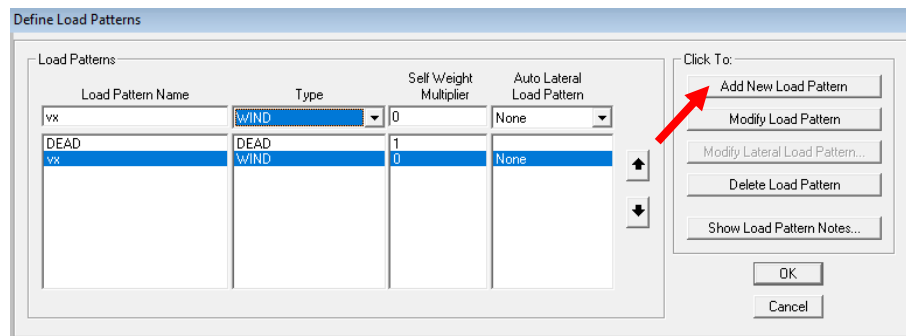


Figura A.12. Añadir nuevo patrón de carga.

Dentro de la pestaña Define (Figura A.11) se encuentra Load Combinations. En esta sección se definen las combinaciones de las cargas previamente definidas. En la ventana Define Load Combinations (Figura A.13), se da clic en Add New Combo. Aparecerá la ventana Load Combination Data (Figura A.14) donde se asigna el coeficiente correspondiente a cada carga.

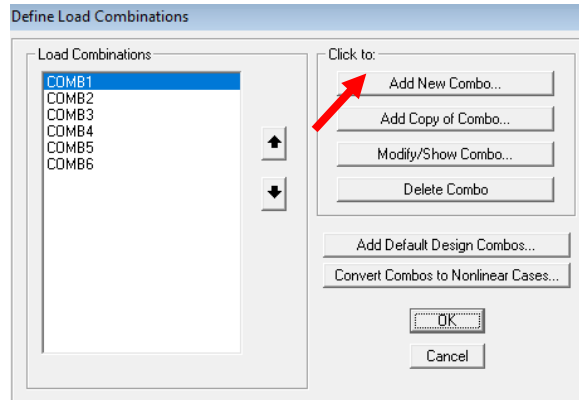


Figura A.13. Definir combinaciones de carga.

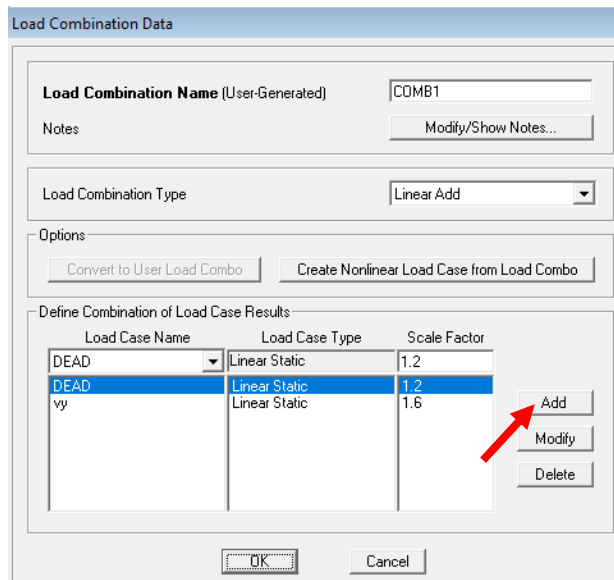


Figura A.14. Añadir combinaciones de carga.

Se seleccionan los nodos a los que se desea aplicar la carga y en la pestaña Assign > Joint Loads > Forces aparece la ventana Joint Forces (Figura A.15) donde se selecciona el tipo de fuerza, se le da un valor y la dirección deseada.

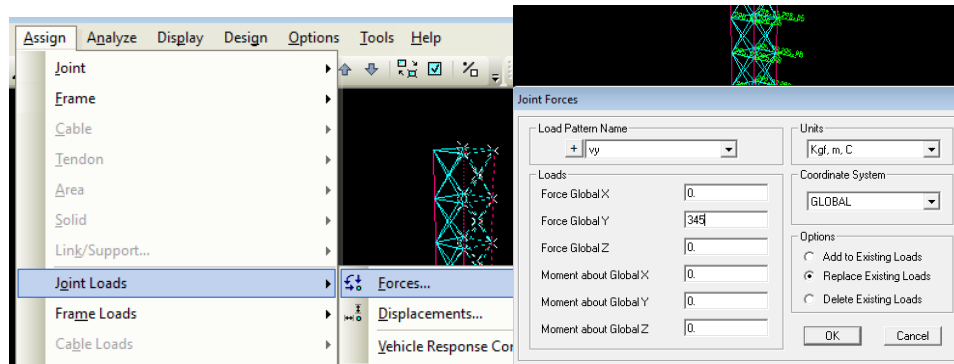


Figura A.15. Asignación de fuerzas.

4. Revisión de esfuerzos

Para evaluar las reacciones de la estructura ante las cargas aplicadas, se da clic en el botón Run Analysis (Figura A.16). Aparecerá la ventana Set Load Cases to Run (Figura A.17) en la cual se seleccionan los casos a ejecutar y se da clic en Run Now. Si se desea seleccionar los combos generados anteriormente, se da clic en la flecha junto al botón Start Steel Design / Check of Structure > Select Design Combos (Figura A.18). Se abrirá la ventana Design Load Combinations Selection y se da clic en el botón Add para añadir los combos con los que se desea revisar.

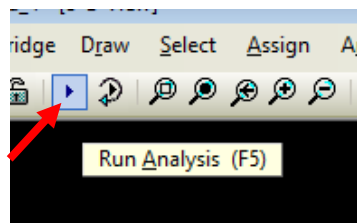


Figura A.16. Correr análisis.

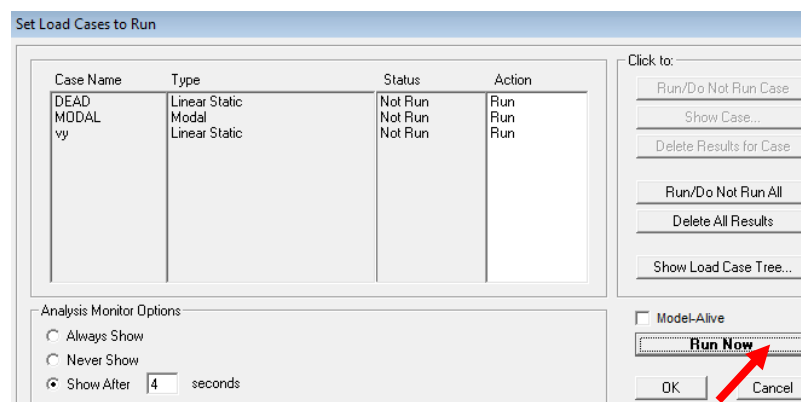


Figura A.17. Casos a ejecutar.

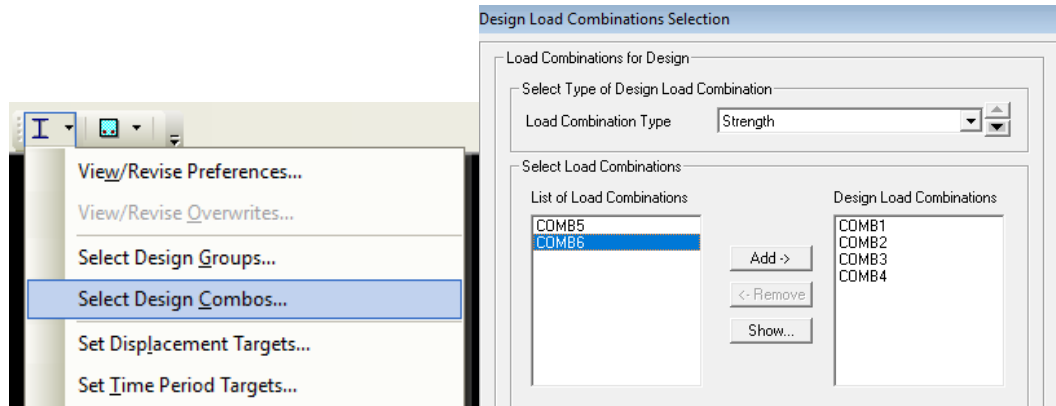


Figura A.18. Selección de combinaciones.

Finalmente, se da clic en el icono Start Steel Design / Check of Structure (Figura A.16). Se generará el análisis de la estructura (Figura A.19) bajo el cual aparece una escala de colores que va del verde al rojo, indicando si el elemento sobre pasa los esfuerzos.

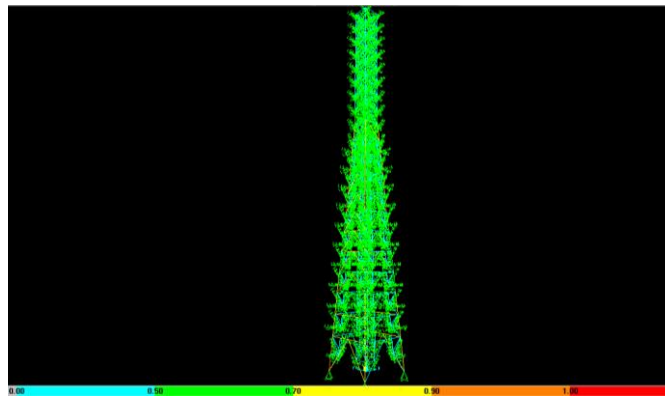


Figura A.19. Verificación de Esfuerzos.

El botón Verify all Memembers Passed (Figura A.20) permite conocer el número de elementos que no resistieron a la carga.

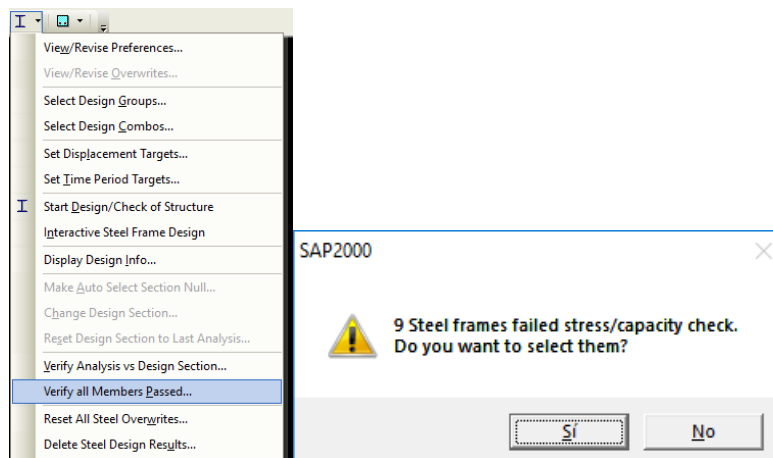


Figura A.20. Verificación de elementos aprobados.