



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Ingeniería

ANÁLISIS DE UNA TORRE DE TELECOMUNICACIONES
ATIRANTADA ANTE LOS EFECTOS DE VIENTO: RELACIÓN DEL
COSTO DE LA TORRE EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

Karen Cecilia Gutiérrez Méndez

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Adrián Pozos Estrada

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM



Fecha
2015

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	DR. ROBERTO GÓMEZ MARTÍNEZ
Secretario:	ING. ERNESTO RENE MENDOZA SÁNCHEZ
Vocal:	DR. ADRIÁN POZOS ESTRADA
1 ^{er} . Suplente:	M.I. CRISTIAN EMMANUEL GONZÁLEZ REYES
2 ^{do} . Suplente:	M.I. RODRIGO TAKASHI SEPÚLVEDA HIROSE

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTORES DE TESIS:

Dr. Adrián Pozos Estrada

Dr. Roberto Gómez Martínez



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/152/14

Señorita
KAREN CECILIA GUTIÉRREZ MÉNDEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. ADRIÁN POZOS ESTRADA, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

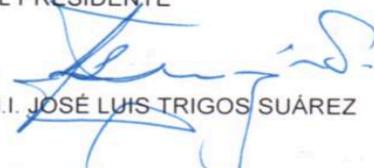
"ANÁLISIS DE UNA TORRE DE TELECOMUNICACIONES ATIRANTADA ANTE LOS EFECTOS DE VIENTO: RELACIÓN DEL COSTO DE LA TORRE EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO"

- I. INTRODUCCIÓN
- ASPECTOS GENERALES DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES Y SELECCIÓN DE LA TORRE A ANALIZAR
- II. ASPECTOS ADMINISTRATIVOS Y TÉCNICOS DE LA INSTALACIÓN Y ANÁLISIS DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES EN MÉXICO
- III. ELEMENTOS DE MODELACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO
- IV. DESCRIPCIÓN DE LOS ANÁLISIS Y RESULTADOS
- V. CONCLUSIONES

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 17 de septiembre del 2014.
EL PRESIDENTE


M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH*gar.

Agradecimientos

A Dios por permitirme cumplir este sueño tan anhelado.

A mi mamá, por ser mi luz, mi guía, mi apoyo y mi consejera. Por creer en mí, por amarme y estar conmigo, tanto en mi felicidad como en mis momentos de declive. Gracias porque si hoy cumplí este gran sueño, es en gran parte por ti. Gracias por ayudarme a ser mejor persona en todos los aspectos.

A mi papá por creer en mí y apoyarme, por seguirme alentando a seguir adelante, tanto profesional como espiritualmente.

A mi hermano, por su gran amor que me tiene.

A mi familia por siempre creer en mí.

A mi tutor el Dr. Adrián Pozos Estrada, por ayudarme en su enseñanza y optimismo a cumplir esta meta.

A mi tutor el Dr. Roberto Gómez Martínez, gracias por permitirme ser parte del Instituto de Ingeniería.

A mis amigos, por estar conmigo siempre, por este tiempo de amistad que llevo con ellos, por sus consejos, alegrías y su gran amor.

A mis sinodales, por su tiempo y enseñanza.

A mis maestros por su sabiduría y el aprendizaje que dejaron en mí.

Al Instituto de Ingeniería, por permitirme estar en sus instalaciones, que me inspiraron a volver y a seguir siendo parte de él.

A la Facultad de Ingeniería que a través de sus aulas e instalaciones pude forjar mi carrera y mis sueños.

Por último, pero no por eso menos importante, a mi alma mater la Universidad Nacional Autónoma de México, que por un gran esfuerzo pude ser parte de esta gran casa de estudios y poder ser universitaria.

Dedicatorias

A mi mamá por ser esa gran mujer, un ejemplo de amor y paciencia. Y que aun en las dificultades estaremos unidas. Te amo mamá.

A mi papá porque sé que siempre seré la niña de sus ojos.

A mi hermano, que aun en las adversidades podemos seguir adelante.

A Valeria por ser una persona tan admirable y especial para mí.

A mi tutor el Dr. Adrián Pozos Estrada, por su sabiduría y paciencia, al cual le tengo una enorme admiración como persona y profesionista.

Al Dr. Roberto Gómez Martínez, por su gran talento.

A mi amada Universidad Nacional Autónoma de México, que me siento tan orgullosa de pertenecer a ella.

A mi Facultad de Ingeniería, por todos los momentos vividos aquí.

Al Instituto de Ingeniería, del cual siempre me sentiré parte.

A mis amigos por ser mi alegría y mi apoyo a lo largo de mi vida.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
OBJETIVO	3
ALCANCES.....	3
CAPÍTULO 1: Aspectos generales de torres de telecomunicaciones y selección de la torre a analizar	4
1.1. Tipos de torres de telecomunicaciones	4
1.1.1. Clasificación de torres de telecomunicaciones	4
1.1.1.1. Torres arriostradas o atirantadas	5
1.1.1.2. Torres autoportadas	6
1.1.1.3. Torres monopolo	7
1.2. Aspectos técnicos a considerar durante y después de la instalación de una torre de telecomunicaciones	8
1.3. Ubicación y descripción de la torre a analizar	9
CAPÍTULO 2. Aspectos administrativos y técnicos de la instalación y análisis de torres de telecomunicaciones en México	12
2.1. Aspectos técnicos del análisis de torres de telecomunicaciones en México.....	13
2.1.1. Efecto del viento en estructuras reticulares	13
2.1.2. Coeficiente de arrastre.....	13
2.1.3. Manual de obras civiles para el diseño por viento de la CFE	15
2.1.3.1. Clasificación de las estructuras de telecomunicaciones	16
2.1.3.2. Clasificación de las estructuras de telecomunicaciones ante la acción del viento.....	17
2.1.3.3. Determinación de la velocidad básica de diseño, V_D	17
2.1.3.4. Categorías de terrenos según su rugosidad	18
2.1.3.5. Velocidad regional, V_R	18
2.1.3.6. Factor de topografía, F_T	20
2.1.3.7. Presión dinámica de base, q_z	21
2.1.3.8. Presión actuante sobre estructuras, p_z	21
2.1.3.9. Análisis estático para torres de telecomunicaciones	22
2.1.3.10. Análisis dinámico	23

2.1.3.10.1.	Determinación de la velocidad media, V'_D	24
2.1.3.10.2.	Presión actuante sobre estructuras, p_z	24
2.1.3.10.3.	Fuerza dinámica equivalente en la dirección del viento, F_{eq}	25
2.1.3.10.4.	Factor de amplificación dinámica para torres de celosía.....	25
CAPÍTULO 3.	Elementos de modelación y descripción del modelo matemático	26
3.1.	Elementos para la modelación matemática	26
3.1.1.	Estructuración del modelo matemático a emplear.....	27
3.1.2.	Apoyos	28
3.2.	Tipo de material de los elementos de la torre	30
3.2.1.	Cables de arriostamiento.....	30
3.2.2.	Secciones de acero.....	31
3.3	Descripción del modelo matemático	32
CAPÍTULO 4.	Descripción de los análisis y resultados	35
4.1.	Criterios adoptados para el diseño de las torres de telecomunicaciones	35
4.2.	Aplicación de las fuerzas inducidas por el viento en la torre	36
4.3.	Análisis de resultados	37
CONCLUSIONES.....		43
RECOMENDACIONES		43
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS		44
APÉNDICE A. CÁLCULO DETALLADO DE LAS PRESIONES Y FUERZAS DEL VIENTO CON EL MOC (2008) DE LA CFE		45

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza el análisis de una torre de transmisión atirantada ante los efectos del viento. Para la caracterización del viento se empleó el Manual de Obras Civiles de Diseño por Viento (MOCDV, 2008) de la Comisión Federal de Electricidad. Con base en los análisis se propone una expresión que relaciona el costo de la estructura y la velocidad de viento.

ABSTRACT

In this work the analyses of a guyed mast telecommunication tower under wind effects is carried out. To characterize the wind forces, the *Manual de Obras Civiles de Diseño por Viento* (MOCDV, 2008) de la Comisión Federal de Electricidad was employed. Base on the analyses an equation that relates the cost of the structure and wind velocity was proposed.

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se realiza el análisis de una torre de transmisión atirantada ante los efectos del viento. Para la caracterización del viento se empleó el Manual de Obras Civiles de Diseño por Viento (MOCDV, 2008) de la Comisión Federal de Electricidad.

En el capítulo 1 se presentan los aspectos básicos generales de torres de telecomunicaciones y la selección de la torre a analizar. En este capítulo también se resumen algunos aspectos a tomar en cuenta durante y después de la instalación de una torre de telecomunicaciones, la importancia de la ubicación y espacio disponible.

Los aspectos administrativos y técnicos de la instalación y análisis de torres de telecomunicaciones en México se exteriorizan en el Capítulo 2. Las definiciones y conceptos para el empleo del MOCDV (2008) se definen en este capítulo.

En el Capítulo 3 se muestran algunos elementos de modelación y se describe el modelo matemático desarrollado para este estudio.

La descripción de los criterios adoptados para el análisis de la torre y los resultados se describen en el Capítulo 4.

Finalmente, en el capítulo de conclusiones se resumen las principales observaciones obtenidas a partir de la elaboración del presente estudio.

OBJETIVO

Analizar una torre de telecomunicaciones atiranta ante los efectos del viento y relacionar el costo de la estructura con la velocidad del viento.

ALCANCES

Sólo se considera un tipo de torre y un ángulo de incidencia del viento.

Capítulo 1

ASPECTOS GENERALES DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES Y SELECCIÓN DE LA TORRE A ANALIZAR

1.1. Tipos de torres de telecomunicaciones

Las estructuras utilizadas en telecomunicaciones sirven para la transmisión de energía eléctrica, así como la transmisión de señales, como en el caso de los teléfonos celulares. Estas estructuras deben soportar diversos dispositivos, como antenas de transmisión y equipos para telecomunicaciones, entre otros. La mayoría de estas estructuras son ligeras y flexibles, por lo que su diseño es comúnmente gobernado por las fuerzas inducidas por el viento.

1.1.1. Clasificación de torres de telecomunicaciones

Su estructuración puede variar según las necesidades y las condiciones del sitio en donde se vayan a colocar. Entre las más comunes se encuentran las torres arriostradas (torres con tirantes), torres auto soportadas y monopolos (figura 1.1). La altura de estas estructuras depende de la altura requerida para poder suministrar una correcta transmisión. La figura 1.1 presenta tres tipos de torres de telecomunicaciones.

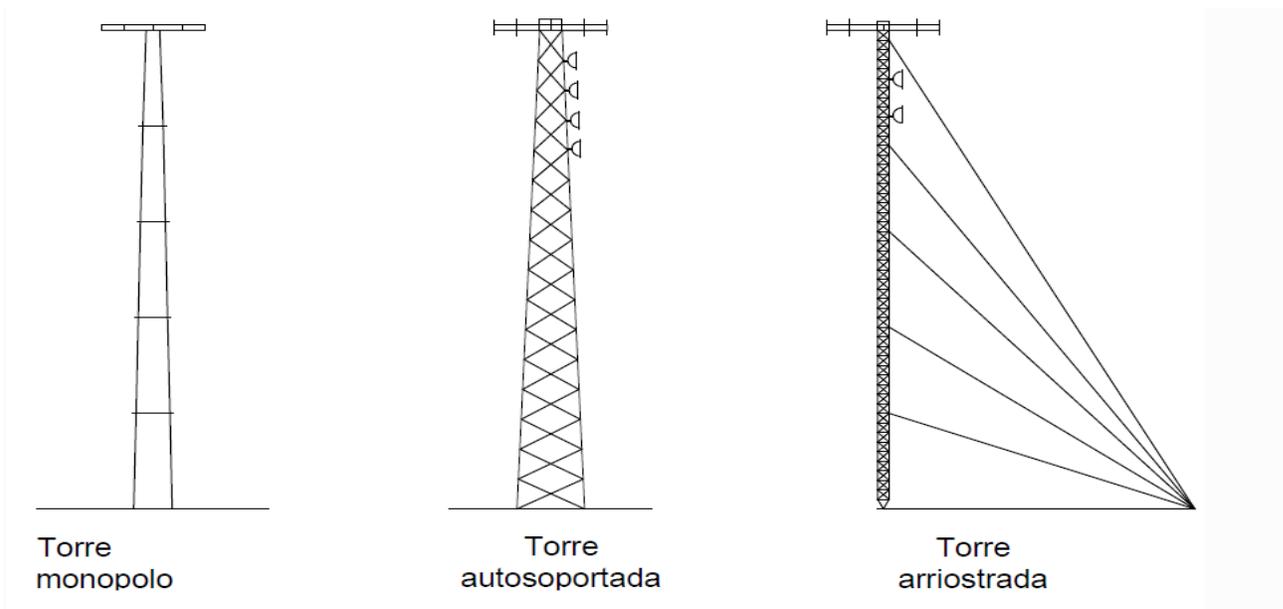


Figura 1.1 Ejemplos de torres de telecomunicaciones

Los elementos estructurales empleados para la construcción de las torres dependen de su tipo, algunos elementos comúnmente empleados incluyen perfiles y ángulos de acero unidos por tornillos, pernos o remaches o por medio de soldadura.

1.1.1.1. Torres arriostradas o atirantadas

En las torres de telecomunicaciones soportadas por tensores, conocidas como torres arriostradas o torres con tirantes (Figura 1.2), los tensores son generalmente de acero de alta resistencia. El empleo de tensores o tirantes permite alcanzar alturas importantes a un costo bajo de material. Estas torres se estructuran con tirantes a diferentes alturas (por lo general de 2/3 de la altura de la torre). La sección transversal más común de las torres de comunicaciones arriostradas es de celosía triangular. Los cables o arriostres se tensan para proporcionar la estabilidad adecuada a la estructura de celosía.



Figura 1.2 Torres arriostradas o atirantadas

Este tipo de torres son ligeras y requieren mayor espacio libre para el anclaje de los cables, los cuales son anclados al terreno mediante bloques.

Muchas veces se requieren instalar antenas celulares en puntos específicos o regiones, por lo que se recurre a construir torres arriostradas sobre edificaciones existentes. Estas torres cuentan generalmente de tirantes o arriostres a diferentes distancias. El peso que genera la torre sobre la estructura existente no es muy grande, por lo que no le adiciona mucho peso a la edificación; sin embargo, se debe de colocar el apoyo de las torres y sus arriostres sobre columnas y elementos resistentes. La descarga de la torre no debe hacerse directamente sobre una losa o algún otro elemento inadecuado, ya que éste podría fallar. La base de la torre transmitirá un esfuerzo de compresión en donde está apoyada, y los arriostres generalmente transmitirán esfuerzos de tensión.

Cuando al centro de la edificación no se cuente con una columna para poder apoyar la base de la torre, se puede recurrir a la colocación de alguna viga de acero o alguna estructura para que la torre se apoye. Esta estructura podrá apoyarse sobre otras columnas de la edificación.

Uso recomendado para las torres arriostradas:

- ✓ Radio base de telefonía celular
- ✓ Equipo de vigilancia por video
- ✓ Turbinas de viento
- ✓ Radio FM
- ✓ Estaciones de TV
- ✓ Equipo meteorológico
- ✓

1.1.1.2. Torres autoportadas

Las torres autoportadas de comunicación (Figura 1.3) son estructuras utilizadas para aplicaciones de telecomunicación. Funcionan como soporte de las antenas de telecomunicaciones y son ampliamente utilizadas en la industria de la radiodifusión y la televisión. Una torre autoportada normalmente cuenta con accesorios prediseñados como plataformas, escaleras, soportes de antenas, accesorios de iluminación y dispositivos de seguridad de escalada, y más. Cuenta con estructuras similares a las de las torres de transmisión y torres de aerogeneradores.



Figura 1.3 Torre autoportada

La estructura de esta torre es del tipo reticular, y se apoya directamente sobre el terreno o sobre la azotea de algún edificio existente. Se llaman autoportadas ya que no utilizan cables o arriostamientos para tomar la carga debida al empuje del viento, razón por la cual su altura comúnmente es menor que las torres arriostradas. Las dimensiones de los elementos que la componen son más robustas que las de una torre arriostrada. Estas torres se construyen sobre terrenos, en áreas urbanas o cerros, y deberán de contar con una cimentación adecuada para poder resistir las fuerzas a las que están sometidas. La geometría de estas torres depende de la altura, la ubicación y del fabricante de la torre.

Uso recomendado de las torres autoportadas:

- ✓ Radio base de telefonía celular
- ✓ Radares
- ✓ Equipo de vigilancia por video
- ✓ Radio Bases Costeras
- ✓ Radares de control de tráfico aéreo
- ✓ Equipo de vigilancia por video

El material empleado para la estructura de las torres autoportada está constituido por los siguientes elementos: montantes, riostras, cartelas y pernos.

1.1.1.3. Torres monopolo

Este tipo de torre se emplea para antenas de radio, su altura generalmente se limita a unos 200 pies (61 m), haciéndolas inadecuadas para cumplir con las necesidades de algunos proveedores de servicios. Entre las principales ventajas de la torre de comunicación monopolo (Figura 1.4) son su peso ligero, poco requisito de espacio y bajo costo de instalación. Otra de las ventajas, es que este tipo de torres se pueden camuflajear como árboles, lo que resulta más estético. Se deberá de construir una cimentación adecuada para resistir los efectos de la carga sobre la torre monopolo.



Figura 1.4 Torre monopolo

Uso recomendado de las torres monopolo:

- ✓ Radio base de telefonía celular
- ✓ Equipo de vigilancia por video
- ✓ Turbinas de viento
- ✓ Radio FM
- ✓ Estaciones de TV
- ✓ Equipo meteorológico
- ✓ Reflector
- ✓ Mástil
- ✓ Cámaras de control de tráfico
- ✓ Para proyecto de Ciudad Segura

Estas torres están fabricadas a base de tubos, placas bridadas o ensambladas. Se equipan con una variedad de accesorios, como plataformas, soportes de antenas, dispositivos de seguridad, luces de obstrucción, kit de protección contra descargas atmosféricas y otros.

Las soldaduras que se utilizan para la construcción de una torre tipo monopolo son precalificadas de acuerdo al código de soldadura estructural. Todas las partes de metal son protegidas por un proceso de galvanizado en caliente llamado *hot-dip*.

1.2. Aspectos técnicos a considerar durante y después de la instalación de una torre de telecomunicaciones

Hay algunas consideraciones que se deben tomar en cuenta durante y después de la instalación de una torre, éstas son:

▪ Carga de la antena

El efecto de la antena sobre una torre depende de la estructura de la torre, del peso de la antena y los cables, de la resistencia al viento y de la altura a la que está colocada. Los fabricantes de antenas generalmente estipulan la resistencia al viento que presentan sus antenas. Las formas curvadas y las perforadas (las rejillas) ofrecen menos resistencia del viento, ya que son más eficientes desde el punto de vista aerodinámico.

▪ Huella de la torres

La huella de la torre es la superficie de terreno requerido para la instalación. Dependiendo de la estructura de la torre, ésta requiere mayor o menor espacio para la instalación. Para torres arriostradas por encima de los 30 m de altura, el anclaje de cada cable necesita típicamente de 10 a 15 m desde la base del mástil.

▪ Presupuesto

Se dice que: "cuanto más pequeña es la base de la torre, es más costoso adquirirla e instalarla", así los monopolos tienen la huella más pequeña de todas las torres, y son por lo tanto el tipo más costoso, seguido de las torres autosoportadas y de las torres atirantadas.

▪ Localización de la torre

El sitio ideal para una torre es un terreno plano. El sitio debe estar libre de obstrucciones como árboles y edificios. Aunque en ocasiones, la azotea de los edificios se emplea para la instalación de las torres.

- Protección contra rayos y fluctuaciones de corriente eléctrica

Es necesario tomar en cuenta la posible descarga de rayos y fluctuaciones de la corriente eléctrica. Por lo anterior se sugiere el empleo de pararrayos y sistemas de protección para el equipo.

- Tierra física

La instalación de la tierra física es necesaria para proveer un cortocircuito a tierra en caso de que caiga un rayo y proveer un circuito para que la energía estática excesiva sea disipada.

- Corrosión

El efecto de la corrosión es más pronunciado en las zonas costeras. Se sugiere tomar precauciones para evitar cualquier aparición de corrosión en los elementos resistentes de las torres.

- Mantenimiento de torres y mástiles

Las torres y mástiles deben ser inspeccionadas al menos un par de veces al año. La inspección debe incluir como mínimo lo siguiente:

- ✓ Las conexiones deben estar en buenas condiciones.
- ✓ Los cables tengan la tensión apropiada.
- ✓ Verificar y corregir cualquier evento de corrosión.

1.3. Ubicación y descripción de la torre a analizar

La ciudad donde se ubicará la estructura es Acapulco, en el estado de Guerrero (Figura 1.5). La selección de este estado se debió a su alto peligro eólico.



Figura 1.5 Estado de Guerrero

En el siguiente mapa (Figura 1.6), se muestra el peligro por huracanes. Se observa en la figura 1.6 que Guerrero es uno de los estados de la República Mexicana con un nivel de peligro alto.

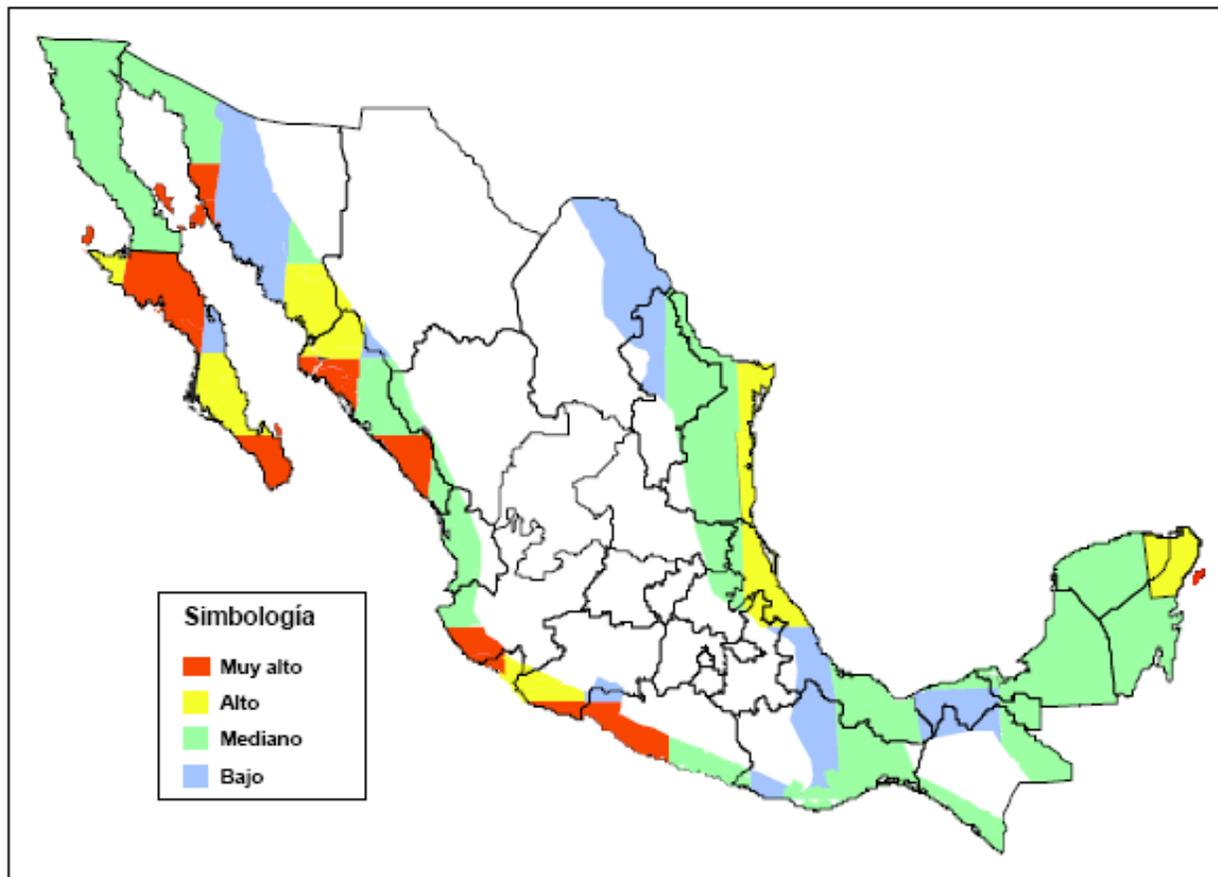


Figura 1.6 Mapa de peligro por incidencia de ciclones (CENAPRED, 2001)

El sitio de construcción se ubica al sur de Chilpancingo, entre los paralelos $16^{\circ} 41' 05''$ y $17^{\circ} 11' 37''$ de latitud norte y meridianos $99^{\circ} 30' 00''$, y $99^{\circ} 59' 49''$ de longitud oeste. El municipio de Chilpancingo presenta tres formas de relieve: accidentado, en un 40%; semiplano, con 40%; y plano, con un 20%. La altitud varía desde el nivel del mar hasta las elevaciones que están representadas por los cerros Potrero, San Nicolás y Alto Carmen.

Las temperaturas del sitio de construcción fluctúan de 24° a 33°C . Las lluvias se presentan principalmente en verano, registrando de 1,000 mm a 1,700 mm, por lo que las actividades agropecuarias están hasta cierto punto garantizadas.

Las características generales de la torre de telecomunicaciones arriostrada que se analizará se presentan en la figura 1.7 y figura 1.8. Los detalles de la torre se presentan en el capítulo 3. La torre contará con conjuntos de cables a diferentes elevaciones de la misma. El ángulo entre cada grupo de cables es de 120° . Los cables se asumen anclados a la base. Se supondrán tramos idénticos de torre de sección triangular (tramos de 3 m de longitud) que se conectan uno sobre el otro.

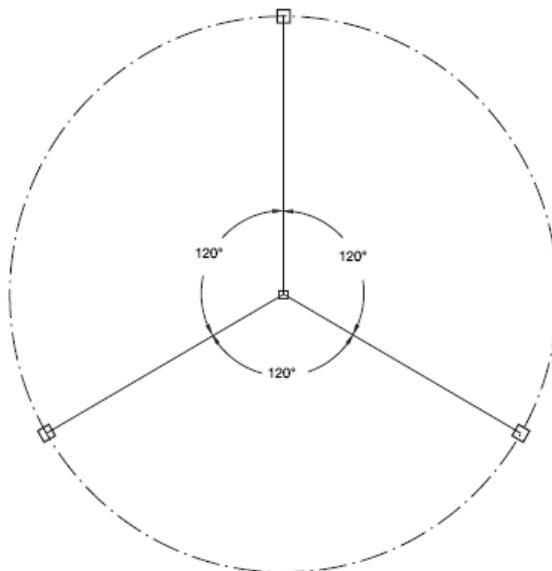


Figura 1.7 Torre arriostrada vista en planta (disposición de los cables)

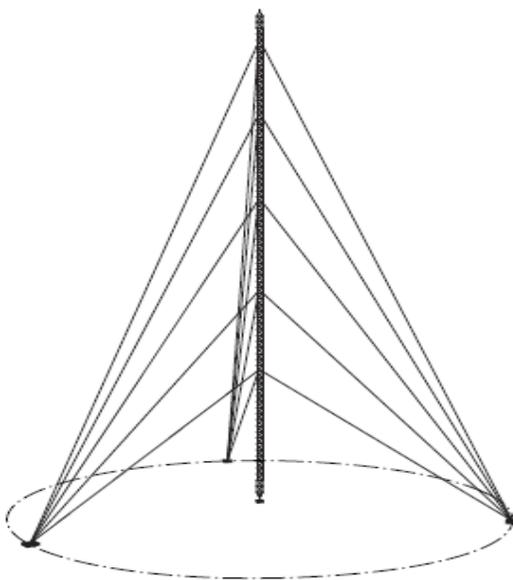


Figura 1.8 Torre arriostrada vista en elevación (disposición de los cables)

Capítulo 2

APECTOS ADMINISTRATIVOS Y TÉCNICOS DE LA INSTALACIÓN Y ANÁLISIS DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES EN MÉXICO

Es importante tomar en cuenta algunos aspectos de importancia que se deben de tomar en cuenta para la instalación de una torre de telecomunicación, éstos son:

- El despliegue de infraestructura, que es un elemento indispensable para una adecuada cobertura,
- Establecer mecanismos regulatorios que promuevan su eficiente despliegue, y
- Concurrencia de facultades que existe entre los diversos órdenes de gobierno, cuya coordinación es necesaria a efecto de promover el despliegue de infraestructura de telecomunicaciones.

La demanda de servicios de telecomunicaciones es mayor en las ciudades que en las zonas rurales. Una red de telecomunicaciones debe de contar con la suficiente capacidad para prestar servicios inalámbricos móviles con una alta calidad de servicio, tal red debe diseñarse con una arquitectura que contemple dar servicio a un máximo de 1,400 personas por radiobase. Para estimar los requerimientos de despliegue de radiobases en México a efecto de cumplir con el parámetro de 1,400 personas por radiobase, en el que se contemplan tres entornos poblacionales, la Tabla 2.1 presenta los requerimientos de despliegue de radiobases por tipo de entorno poblacional que permitirían la provisión de servicios con una calidad equivalente a una red de primer nivel, que permite a sus usuarios contar con servicios de alta calidad.

Tabla 2.1 Despligie de radiobases por entorno social en México

Entorno		Rango de población	Habitantes por rango poblacional	Número de localidades	Población promedio por localidad	Número de radiobases para localidades promedio	Número de radiobases por tipo de entorno
Rural		Hasta 2,499 habitantes	26'049,128	188,593	138	0.99	18,607
Urbano	Alto	Entre 2,500 y 999,999 habitantes	71'458,064	3,640	19,631	14	51,041
	Bajo	Más de 1,000,000 de habitantes	14'829,346	11	1,348,122	963	10,592
			112'336,538	192,244	Total estimado nacional		80,240

Se observa en la tabla anterior que para cumplir el parámetro de 1,400 personas por radiobase, se requieren poco más de 80,000 radiobases desplegadas a nivel nacional. Actualmente en México se cuenta con un despliegue estimado de 22,000, lo que evidencia la necesidad de incrementar el número de radiobases.

Aunado a la parte administrativa, también es necesario conocer los aspectos técnicos para el análisis de este tipo de infraestructura. Estos aspectos son discutidos en las siguientes secciones.

2.1. Aspectos técnicos del análisis de torres de telecomunicaciones en México

2.1.1. Efecto del viento en estructuras reticulares

Se dice que una estructura plana de barras es reticulada (Figura 2.1) cuando las barras conectadas en un mismo nodo forman un ángulo constructivo invariable. Los movimientos de los nodos (desplazamientos y giros) pueden dar lugar a la aparición de momentos flexionantes, esfuerzos cortantes y esfuerzos axiales en las barras.

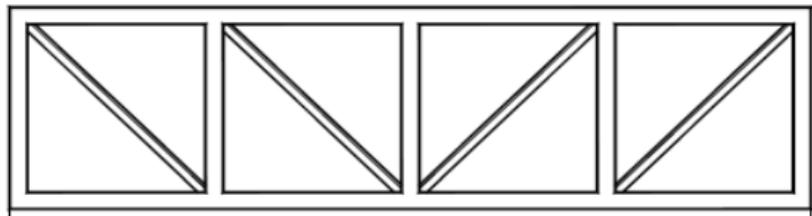


Figura 2.1 Elementos barra en un arreglo reticular

La estructura reticular mostrada, presenta porosidad (área libre), lo que puede tener impacto en el cálculo de la fuerzas del viento.

2.1.2. Coeficiente de arrastre

El coeficiente de arrastre es una medida adimensional que describe la cantidad de arrastre aerodinámico causado por el flujo de un fluido. Todo cuerpo que esté inmerso en la corriente de un fluido estará sometido a fuerzas y momentos que dependen de la forma y orientación con respecto al flujo. El arrastre es una fuerza mecánica, que es generada por la interacción y contacto de un cuerpo y un fluido.

La fuerza de arrastre o arrastre se puede representar como un vector que va en la dirección contraria al movimiento del cuerpo. Existen muchos factores que afectan la magnitud del arrastre, uno de ellos es la forma del cuerpo en estudio, el cual puede producir una determinada distribución de las presiones debido a las velocidades locales. Integrando estas presiones sobre toda la superficie del cuerpo, en la dirección del viento, se obtiene la fuerza de arrastre.

El coeficiente de arrastre para estructuras reticulares depende de la porosidad. Considere la placa porosa de la Figura 2.2.

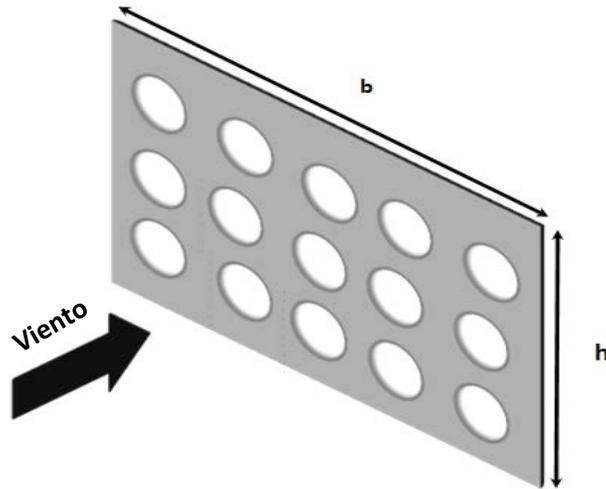


Figura 2.2 Placa porosa

El coeficiente de arrastre (C_a) para una estructura porosa o reticular se relaciona con el factor de porosidad (K_p), definido como:

$$K_p \cong 1 - (1 - \delta)^2 \quad (2.1)$$

donde δ se denomina relación de solidez, definida como:

$$\delta = \frac{\text{Area sólida}}{\text{Area total (b x h)}} \quad (2.2)$$

Finalmente, el coeficiente de arrastre para estructuras reticulares está dado por:

$$C_a = C_D \cdot K_p \quad (2.3)$$

donde C_D es un coeficiente de arrastre para estructuras no reticulares.

La figura 2.3 presenta los valores de coeficientes de arrastre para estructuras reticulares (torres de celosía) en función de la relación de solidez, propuestos en el manual de diseño de obras civiles para diseño por viento de la CFE.

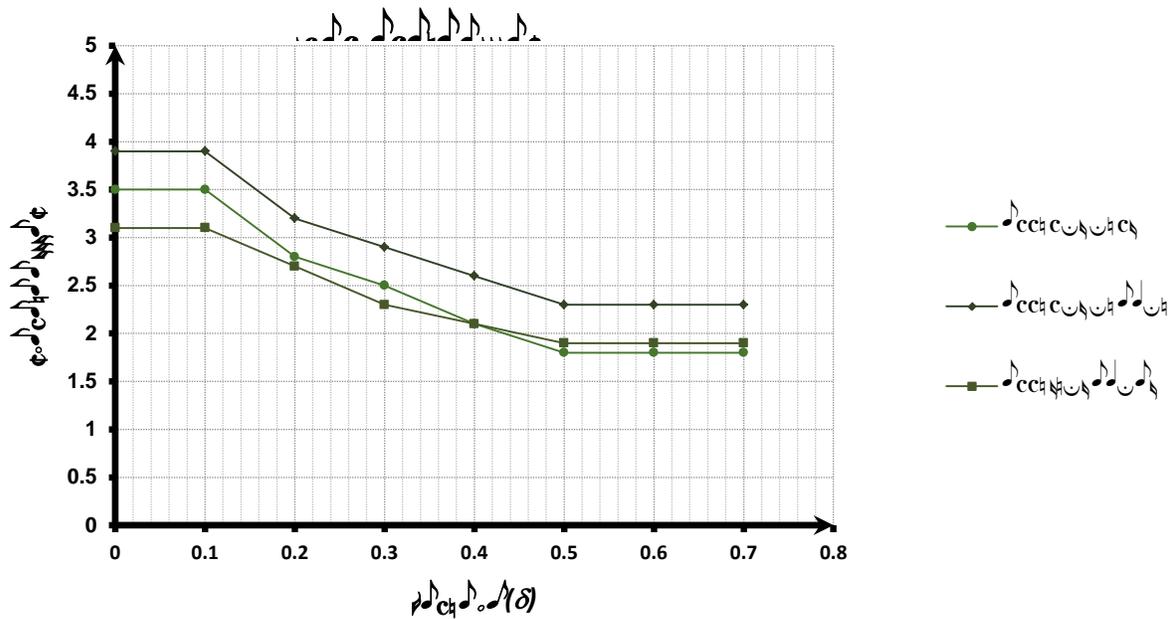


Figura 2.3 Coeficientes de arrastre para torres de celosía en función de la relación de solidez

La figura 2.3 muestra la variación de C_a en función de δ para diferentes tipos de torres de celosía. Se observa de la figura que a mayor valor de relación de solidez, el coeficiente de arrastre disminuye y entre menor es el valor de la relación de solidez, el coeficiente de arrastre aumenta. Esto se debe a que el viento, al tener que fluir a través de un mayor número de caras en la sección hueca, induce un incremento en el arrastre. Lo anterior se ejemplifica con la Figura 2.4.

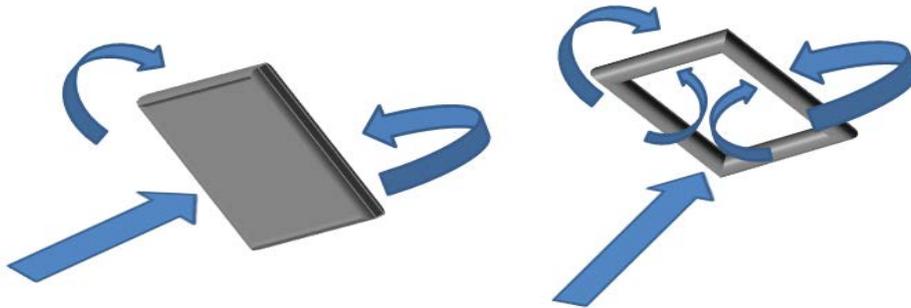


Figura 2.4 Sección sólida y hueca

El manual de obras civiles para el diseño por viento de la CFE es el documento que comúnmente se emplea para la revisión de los efectos del viento en estructuras. Los aspectos más relevantes de este manual se discuten a continuación.

2.1.3. Manual de obras civiles para el diseño por viento de la CFE

Un resumen del procedimiento sugerido por el manual para considerar el efecto del viento en una estructura se presenta en la Figura 2.5.

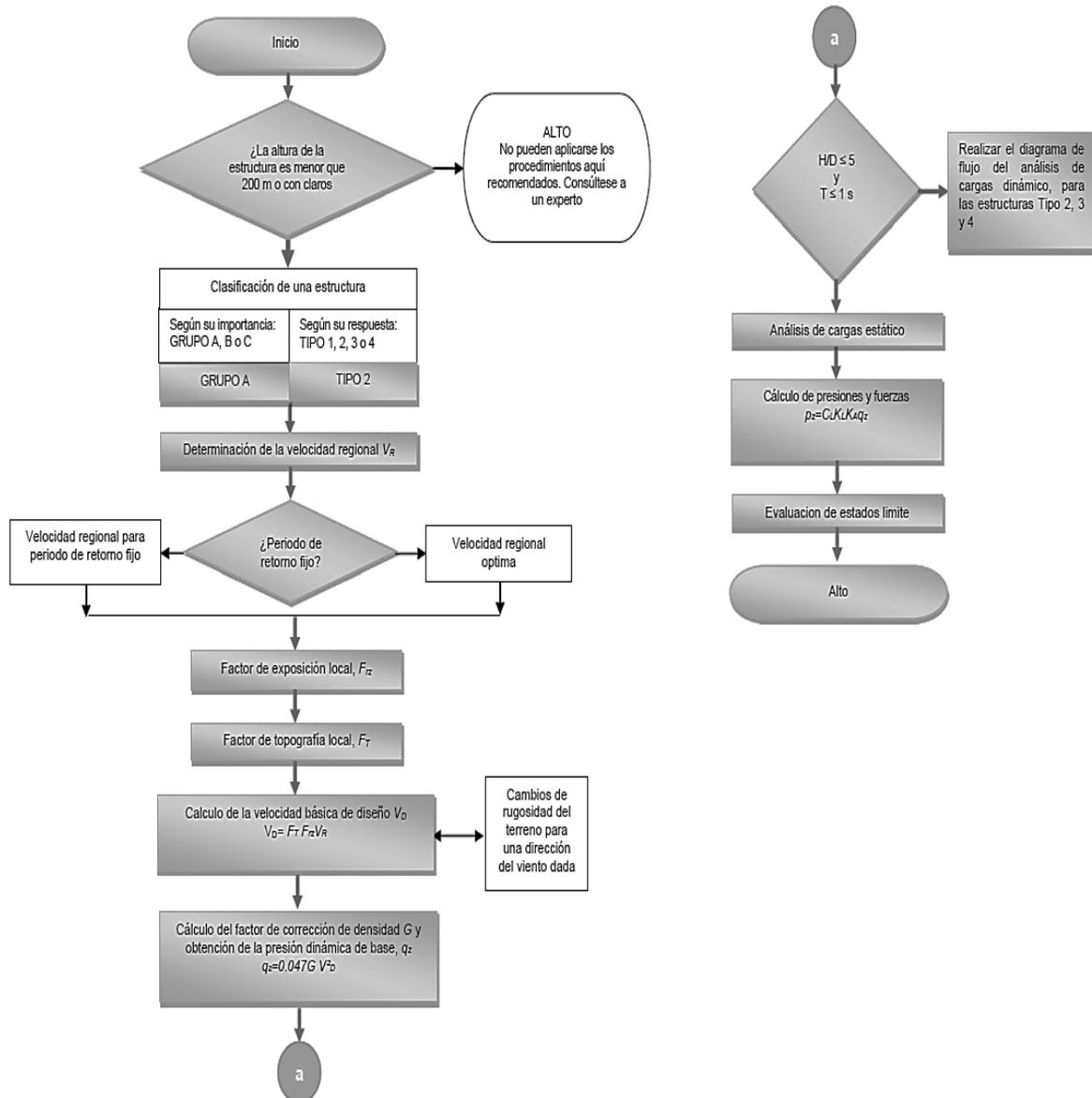


Figura 2.5 Diagrama de flujo del procedimiento para obtener las cargas por viento

Las definiciones de los términos mostrados en el diagrama de flujo de la Figura 2.5 se presentan en las siguientes secciones.

2.1.3.1. Clasificación de las estructuras de telecomunicaciones

Estas estructuras se pueden clasificar dentro del grupo A, ya que son fundamentales para los procesos de comunicación. El manual indica lo siguiente:

“GRUPO A Estructuras con un grado de seguridad elevado. Se incluyen en este grupo aquellas cuya falla cause la pérdida de un número importante de vidas, o perjuicios económicos o culturales excepcionalmente altos; las construcciones y depósitos cuya falla implique un peligro significativo por almacenar o contener sustancias tóxicas o inflamables; las construcciones cuyo funcionamiento es imprescindible y debe continuar después de la ocurrencia de vientos fuertes y las construcciones cuya falla impida la operación de plantas termoeléctricas, Hidroeléctricas y nucleares. Ejemplos de estas

estructuras son: áreas de reunión con capacidad mayor que doscientas personas (salas de espectáculos, auditorios y centros de convenciones), locales y cubiertas que alojen equipo especialmente costoso, museos, templos, estadios, terminales de distribución de hidrocarburos, centrales telefónicas e inmuebles de telecomunicaciones principales, estaciones terminales de transporte, estaciones de bomberos, de rescate y de policía, hospitales e inmuebles médicos con áreas de urgencias, centros de operación en situaciones de desastre, escuelas, chimeneas, subestaciones eléctricas.”

2.1.3.2. Clasificación de las estructuras de telecomunicaciones ante la acción del viento

La estructura a analizar pertenece al TIPO 2, estas estructuras son descritas por el manual de la siguiente manera:

“TIPO 2 Estructuras que, por su alta relación de esbeltez o las dimensiones reducidas de su sección transversal, son sensibles a la turbulencia del viento y tienen periodos naturales que favorecen la ocurrencia de oscilaciones importantes por la acción del viento. En este tipo se incluyen los edificios con relación de esbeltez, mayor que cinco o con periodo fundamental mayor que un segundo; las torres de celosía atirantadas, chimeneas, tanques elevados, antenas, bardas, parapetos, anuncios y las construcciones que presentan una pequeña dimensión paralela a la dirección del viento.”

Las acciones del viento que deben considerarse para este tipo de estructuras son:

ACCIÓN I Empujes medios. Son causados por presiones y succiones del flujo medio del viento, tanto exteriores como interiores y generan presiones globales (para el diseño de la estructura en conjunto) y locales (para el diseño de un elemento estructural o de recubrimiento en particular). Se considera que estos empujes no varían con el tiempo.

ACCIÓN II Vibraciones generadas por ráfagas turbulentas en la dirección del viento. Las generan fuerzas variables, paralelas al flujo medio, causadas por la turbulencia del viento y cuya fluctuación en el tiempo influye en la respuesta estructural.

ACCIÓN III Vibraciones transversales al flujo y torsión. La presencia de estructuras cilíndricas o prismáticas dentro del flujo del viento, genera el desprendimiento de vórtices alternantes que provocan fuerzas y vibraciones transversales a la dirección del flujo. Por otro lado, la posible distribución asimétrica de presiones en las estructuras puede ocasionar fuerzas de torsión sobre éstas.

ACCIÓN IV Inestabilidad aerodinámica. Es generada por la amplificación dinámica de la respuesta estructural causada por: la geometría de la construcción, los distintos ángulos de incidencia del viento, las propiedades dinámicas de la estructura y el cambio de amortiguamiento aerodinámico.

El presente trabajo se limita al estudio de las acciones I y II.

2.1.3.3. Determinación de la velocidad básica de diseño, V_D

La velocidad básica de diseño, en km/h, se obtendrá con la siguiente ecuación:

$$V_D = F_T F_{Tz} V_R \quad (2.4)$$

donde:

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

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

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

2.1.3.4. Categorías de terrenos según su rugosidad

En la siguiente tabla se resumen los tipos de terreno y su descripción de acuerdo al manual.

Tabla 2.1 Categorías del terreno

Cat.	Descripción	Ejemplos	Limitaciones
1	Terreno abierto, prácticamente plano, sin obstrucciones y superficies de agua.	Franjas costeras planas, zonas de pantanos o de lagos, campos aéreos, pastizales y tierras de cultivo sin setos o bandas alrededor, superficies nevadas planas.	La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser de 2000 m o 10 veces la altura de la construcción por diseñar, la que sea mayor.
2	Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones.	Campos de cultivos o granjas con pocas obstrucciones tales como setos o bardas alrededor, árboles y construcciones dispersas.	Las obstrucciones existentes, tienen alturas de 1.5 a 10 m, la mayor entre 1500 m o 10 veces la altura de la construcción por diseñar.
3	Terreno cubierto por numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas.	Áreas urbanas, suburbanas y de bosques, o cualquier terreno con numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas. El tamaño de las construcciones corresponde al de las casas y viviendas.	Las obstrucciones existentes presentan altura de 3 a 5 m. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser de 500m o 10 veces la altura de la nueva construcción, la que sea mayor.
4	Terreno con numerosas obstrucciones largas, altas y estrechamente espaciadas.	Centros de grandes ciudades y complejos industriales bien desarrollados.	Por lo menos el 50% de los edificios tiene una altura mayor que 20 m. Las obstrucciones miden de 10 a 30 m de altura. La longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser la mayor entre 400 m y 10 veces más la altura de la nueva construcción.

2.1.3.5. Velocidad regional, V_R

De acuerdo al manual, la velocidad regional de ráfaga para diseño puede determinarse de dos maneras. Una de ellas es empleando la importancia de la estructura que está relacionada con un periodo de retorno fijo. La otra manera está asociada con el costo relativo aceptable de las consecuencias en caso de producirse una falla estructural. En este estudio se selecciona la primera opción.

Las velocidades regionales se proporcionan bajo condiciones homogéneas preestablecidas: categoría del terreno 2, velocidades asociadas con ráfagas de 3 segundos y evaluadas a 10 m de altura, en terreno plano. Por tanto, al aplicar los factores de exposición y topografía, se estarán considerando las condiciones reales del sitio de desplante.

Las Figuras 2.6 a 2.8 muestran los mapas de isotacas regionales correspondientes a los periodos de retorno de 200, 50 y 10 años, respectivamente.

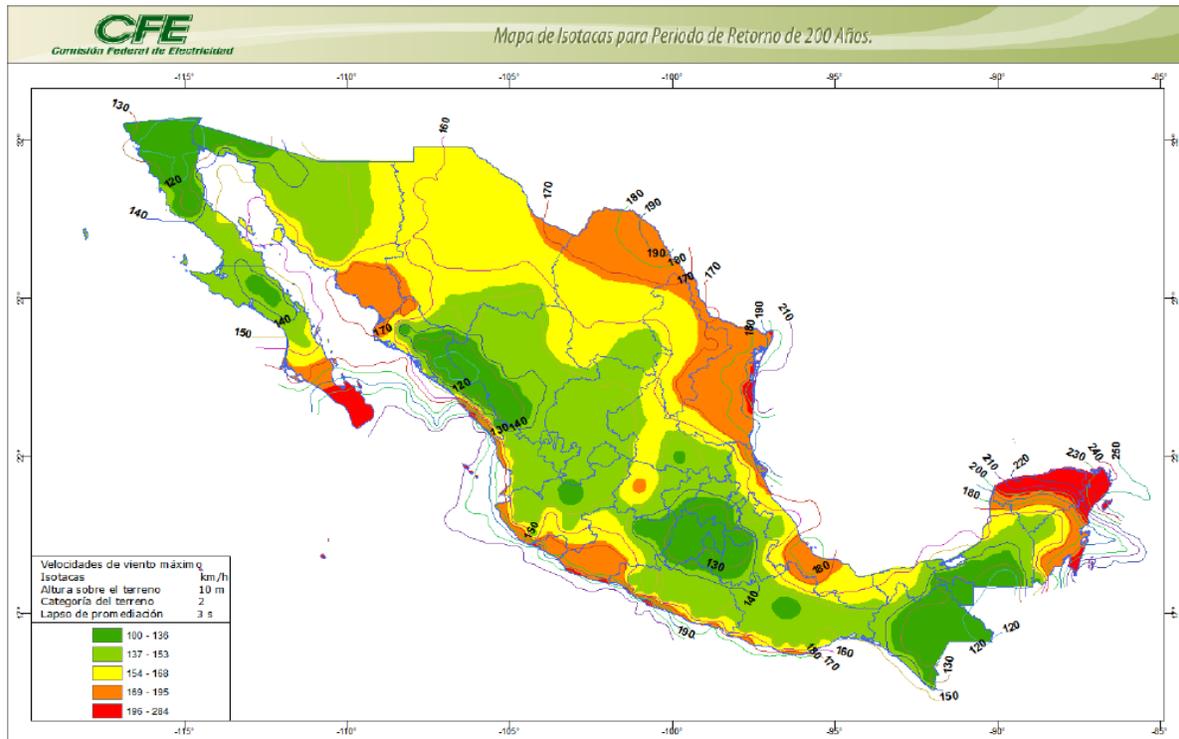


Figura 2.6 Mapa de isotacas para un periodo de retorno de 200 años

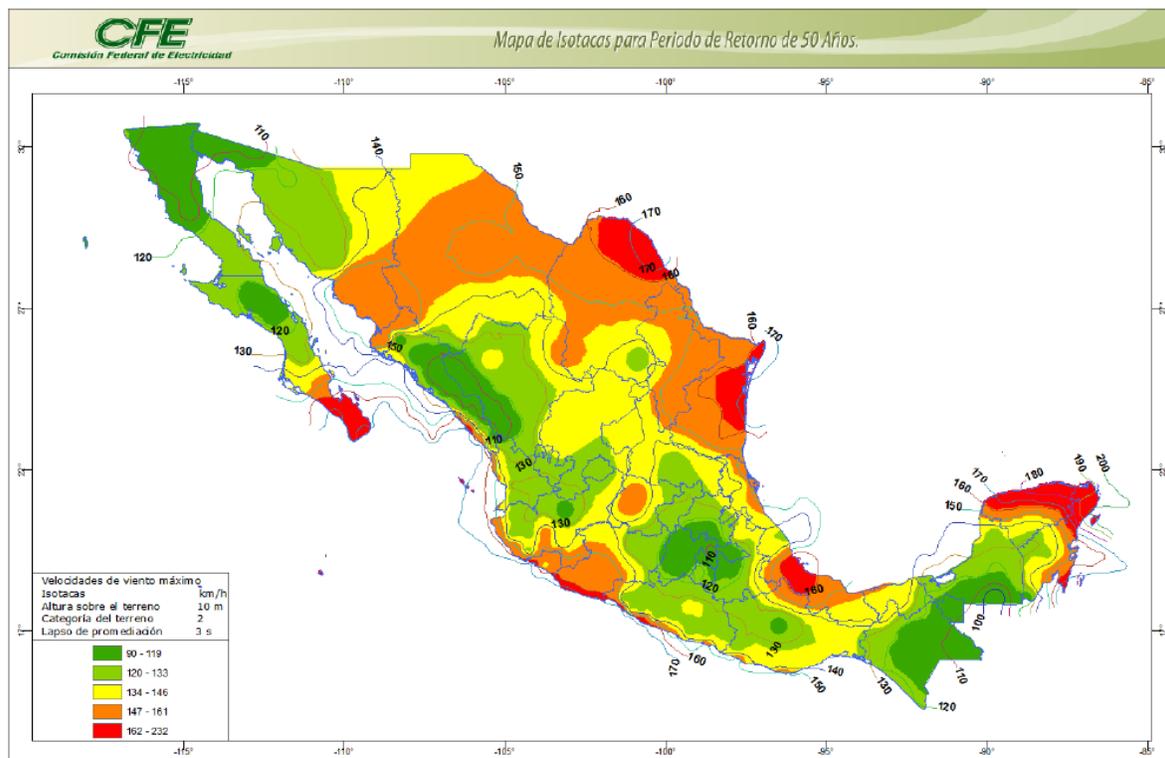


Figura 2.7 Mapa de isotacas para un periodo de retorno de 50 años

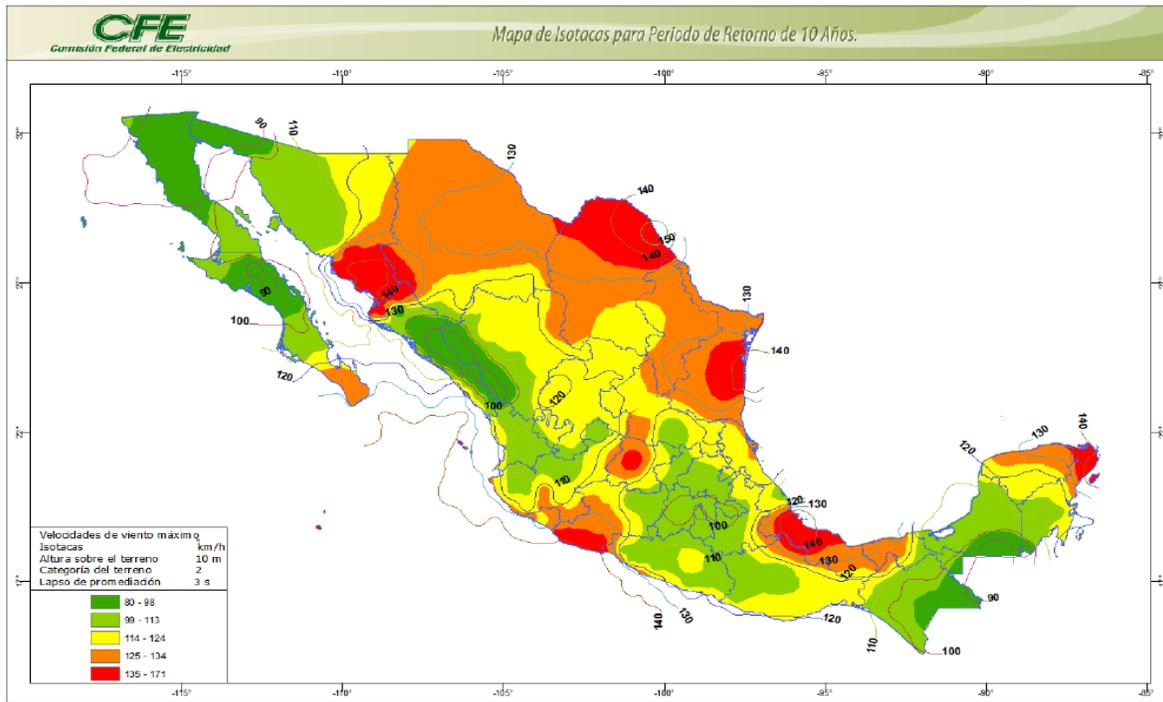


Figura 2.8 Mapa de isotacas para un periodo de retorno de 10 años

2.1.3.6. Factor de topografía, F_T

Este factor (Tabla 2.2) toma en cuenta el efecto topográfico local del sitio en donde se desplantará la estructura. En la tabla 2.2 se presentan los factores de topografía para diferentes tipos de terreno.

Tabla 2.2 Factor de topografía

	Ejemplos de topografía local	F
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.	Para este tipo de topografía, el manual sugiere el empleo de ecuaciones para obtener F_T .
	Terraplenes: Peñascos, acantilados, precipicios, diques, presas.	

2.1.3.7. Presión dinámica de base, q_z

Cuando el viento actúa sobre una construcción, genera presiones sobre sus superficies, que varían según 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 q_z , en Pa, y se determina con la siguiente ecuación:

$$q_z = 0.047 G V_D^2 \quad (2.5)$$

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

en donde:

V_D es la velocidad básica de diseño, en km/h

q_z la presión dinámica de base a una altura z sobre el nivel del terreno, en Pa, y

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

El valor de G se obtiene con la siguiente expresión:

$$G = \frac{0.392\Omega}{273+\tau} \quad (2.6)$$

en donde:

Ω es la presión barométrica, en mm de Hg, y

τ la temperatura ambiental, en °C.

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

Tabla 2.3 Presión barométrica en función de la altitud

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

2.1.3.8. Presión actuante sobre estructuras, p_z

La presión actuante sobre una construcción, p_z , en Pa, se obtiene con la ecuación:

$$p_z = C_p q_z \quad (2.7)$$

en donde C_p es el coeficiente de presión, adimensional.

El coeficiente de presión se define como el cociente de una diferencia de presiones a la presión dinámica de base, para una altura dada. Este coeficiente depende de la geometría de la estructura.

Los tipos de análisis que se toman en cuenta en este estudio son los descritos en la Sección 2.2.3.2 y se detallan a continuación.

2.1.3.9. Análisis estático para torres de telecomunicaciones

A continuación se presenta el procedimiento para obtener las fuerzas estáticas de diseño, en la dirección del flujo del viento, en torres de telecomunicaciones.

La fuerza estática para el diseño de estas estructuras, se obtiene para cada tramo o sección en que se dividan verticalmente las mismas; se sugiere emplear un mínimo de diez tramos. Así, dicha fuerza se calcula con la ecuación:

$$F_{at} = C_{at} A_{At} q_{zt} \quad (2.8)$$

en donde F_{at} es la fuerza de arrastre en el tramo considerado que actúa en la dirección del viento, en N; C_{at} es el coeficiente de arrastre para el tramo considerado, en la dirección del flujo del viento; se obtiene de lo especificado en este apartado o con base en pruebas de túnel de viento, adimensional; A_{At} es el área de los miembros de la cara frontal del tramo considerado, proyectada perpendicularmente a la dirección del viento, en m^2 , y q_{zt} es la presión dinámica de base dada en el inciso 4.2.5 y calculada a la altura z en que se encuentra el punto medio de la longitud vertical del tramo, en Pa.

Los coeficientes de arrastre, C_{at} , para las secciones de la torre sin accesorios recomendados en el manual se muestran en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Coeficientes de arrastre, C_{at} , para secciones de la torre sin accesorios

Relación de solidez de la cara frontal (Φ)	Coeficiente de arrastre (C_{at})		
	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

Cuando se desee considerar accesorios en la torre, el manual sugiere el empleo de expresiones para estimar el aumento del coeficiente de arrastre. En este estudio sólo se considera la parte estructural de la torre.

2.1.3.10. Análisis dinámico

El análisis dinámico se emplea para evaluar la acción resultante de la interacción dinámica entre el flujo del viento y las estructuras pertenecientes a los Tipos 2 y 3. El procedimiento de análisis dinámico se presenta en el siguiente diagrama de flujo (figura 2.9).

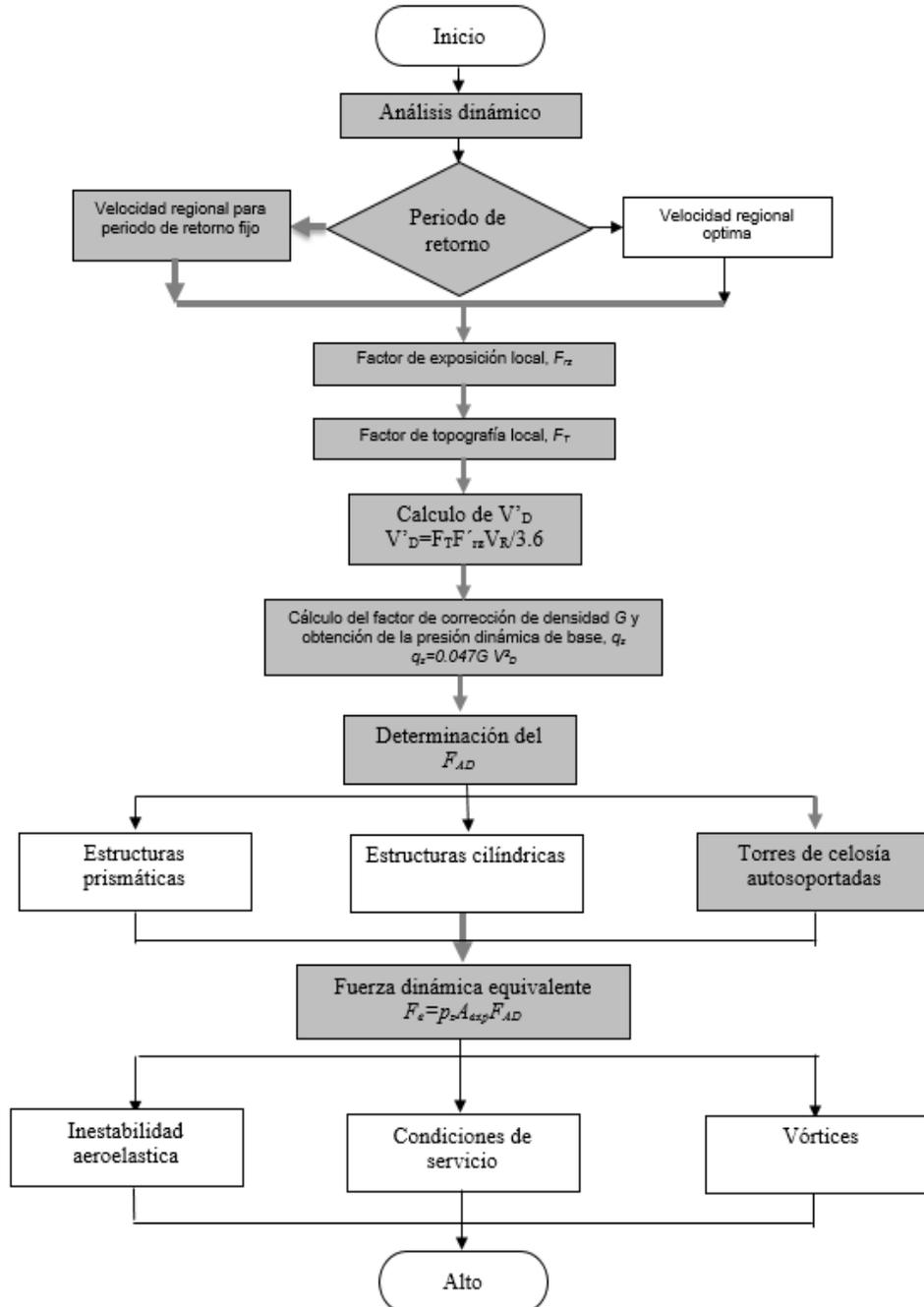


Figura 2.9 Diagrama de flujo del análisis dinámico

Los pasos para determinar la fuerza dinámica equivalente se presentan a continuación.

2.1.3.10.1. Determinación de la velocidad media, V'_D

Se define la velocidad media, V'_D , en m/s, la cual corresponde a un tiempo de promediación de diez minutos y se aplicará para determinar el factor de respuesta dinámica. Esta velocidad media se determina con la siguiente expresión:

$$V'_D = \frac{F_T F'_{r_z} V_R}{3.6} \quad (2.9)$$

en donde:

V_R es la velocidad regional de ráfaga, en km/h,

F_T es el factor de topografía y, (ya antes definido con respecto al tipo de terreno)

F'_{r_z} es el factor de exposición para la velocidad media.

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

$$F'_{r_z} = 0.702 \bar{b} \quad \text{Si } z \leq 10 \quad (2.10a)$$

$$F'_{r_z} = 0.702 \bar{b} \left(\frac{z}{10} \right)^{\alpha'} \quad \text{Si } 10 < z \leq 200 \quad (2.10b)$$

en donde:

z es la altura medida a partir del nivel medio del terreno, en la cual se desea calcular la velocidad media del viento, en m,

\bar{b} un coeficiente, adimensional, que se obtiene de la Tabla 2.5, y

α' el exponente, adimensional, de la variación de la velocidad con la altura, para cada categoría de rugosidad del terreno; corresponde a un intervalo de promediación de diez minutos.

Tabla 2.5 Parámetros \bar{b} y α' para diferente tipo de categoría de terreno

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

2.1.3.10.2. Presión actuante sobre estructuras, p_z

La presión actuante sobre la estructura, p_z , en Pa, se obtiene con la ecuación:

$$p_z = C_p q_z \quad (2.11)$$

en donde:

C_p es el coeficiente de presión, adimensional, y

q_z la presión dinámica de base, en Pa, a una altura z sobre el nivel del terreno.

2.1.3.10.3. Fuerza dinámica equivalente en la dirección del viento,

F_{eq}

Para el viento que actúa sobre cualquier cara de la torre, la fuerza de arrastre de diseño deberá calcularse con la siguiente ecuación:

$$F_{eq} = q_z C_{at} A_{ref} F_{AD} \quad (2.12)$$

en donde:

F_{eq} es la fuerza de dinámica equivalente, en N, que actúa paralelamente a la dirección del viento y es variable con la altura,

q_z la presión dinámica de base del viento a la altura z , en Pa,

C_{at} el coeficiente de arrastre, en la dirección del flujo del viento,

A_{ref} el área de todos los miembros de la cara frontal, a una altura z , proyectada en un plano vertical perpendicular a la dirección del viento, en m^2 , y

F_{AD} el factor de amplificación dinámica, adimensional.

2.1.3.10.4. Factor de amplificación dinámica para torres de celosía

El factor de amplificación dinámica para torres de celosía, se calcula con la siguiente ecuación:

$$F_{AD} = \frac{1+2I_v(z_s)k_p\sqrt{B^2+R^2}}{1+7I_v(z_s)} \left[\frac{C_{RG}}{C_G} \right] F_M \quad (2.13)$$

en donde:

B^2 es el factor de respuesta de fondo,

$I_v(z_s)$ el índice de turbulencia a la altura de referencia, z_s ,

R^2 el factor de respuesta en resonancia, adimensional,

k_p el factor pico, adimensional,

C_{RG} y C_G las constantes correctivas de la forma modal, dimensionales; respectivamente,

F_M el factor de corrección de la masa, adimensional, y

z_s la altura de referencia, en m.

Capítulo 3

ELEMENTOS DE MODELACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

3.1. Elementos para la modelación matemática

Las torres de telecomunicaciones son estructuras reticulares y se conforman de barras dispuestas en diferentes formas (cuadrada, triangular, etc.) articuladas en sus nudos. El triángulo es la única forma estructural compuesta por barras articuladas en sus nudos, capaz de resistir grandes deformaciones debido al giro de las barras (Figura 3.1). Las barras de las estructuras reticulares trabajan solamente a tracción o compresión, presentando flexiones muy pequeñas. El material más eficiente para este tipo de estructuras es el acero. El acero permite crear estructuras muy resistentes y ligeras.

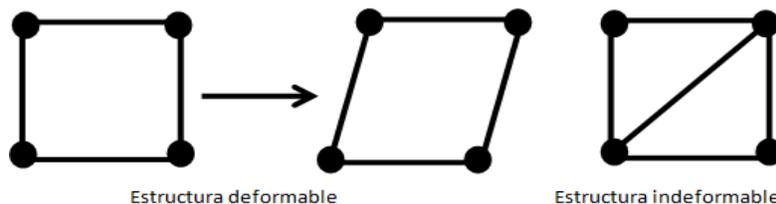


Figura 3.1 Ejemplo de estructuras deformable e indeformable debido al giro de los nudos

3.1.1. Estructuración del modelo matemático a emplear

El modelo matemático se desarrolló con base en elementos prismáticos, dispuestos de tal manera que el área encerrada por el perímetro de la estructura queda subdividida en figuras geométricas, en su gran mayoría triángulos que se consideran unidos mediante articulaciones sin fricción, en donde se aplicarán las cargas, como se muestra en el esquema (Figura 3.2).

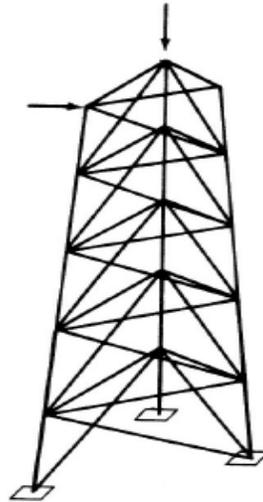


Figura 3.2 Esquema de la estructuración del modelo matemático

Por las características del modelo, los elementos resistentes estarán sometidos a fuerzas axiales de tensión o compresión (Figura 3.3). El peso propio de la estructura también puede inducir esfuerzos, aunque éstos pueden ser menores que los inducidos por el viento o la tensión de los cables, en el caso de torres arriostradas.

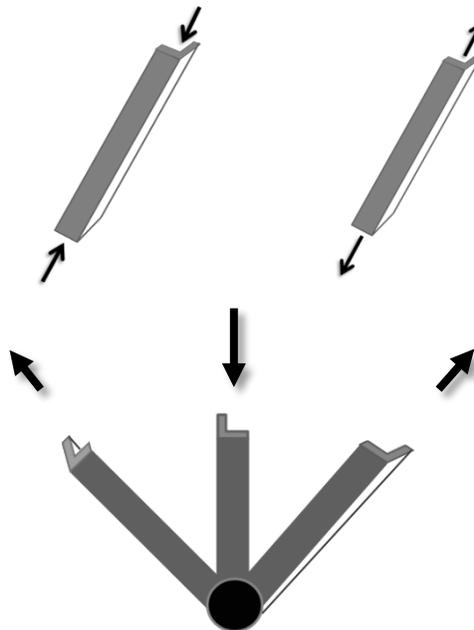


Figura 3.3 Elementos a tensión y compresión

Las conexiones en los nudos están formadas usualmente por pernos o soldadura en los extremos de los miembros unidos a una placa común llamada placa de unión. Tras la deformación de la estructura, las barras no mantienen los ángulos iniciales (Figura 3.4); sin embargo, éstas permanecen en equilibrio.

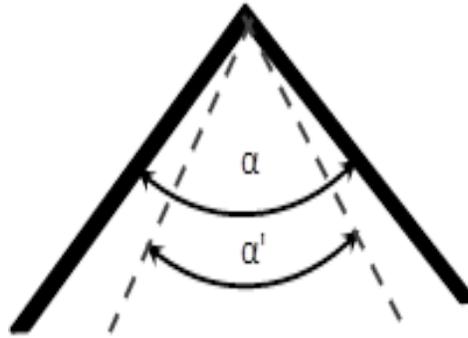


Figura 3.4 Ilustración de la deformación en la unión de dos elementos

3.1.2. Apoyos

Para evitar una condición de inestabilidad, las estructuras deben estar apoyadas en uno o más puntos. Los apoyos generarán diferentes tipos de reacciones, la cual dependerá de la restricción que el apoyo induzca sobre la estructura. Las fuerzas generadas en los apoyos son opuestas en dirección a las fuerzas de la estructura que actúan en ese punto. Existen tres tipos de reacciones:

1. Reacciones equivalentes a una fuerza con línea de acción conocida (apoyo articulado). Generadas por apoyos tipo: patines o rodamientos, balancines, superficies sin fricción, eslabones y cables cortos, collarines sobre barras sin fricción y pernos en ranuras lisas. En las reacciones de este tipo hay una sola incógnita.
2. Reacciones equivalentes a una fuerza de dirección desconocida (apoyo fijo). Generadas por pernos lisos en orificios ajustados, articulaciones y superficies rugosas. En las reacciones de este grupo intervienen dos incógnitas.
3. Reacciones equivalentes a una fuerza y a un par (empotrado). Producidas por soportes fijos que impiden cualquier movimiento del cuerpo inmovilizándolo por completo y obligándolo a reaccionar con tres fuerzas incógnitas (dos componentes de traslación y un momento).

Además de las reacciones básicas descritas arriba, también existen combinaciones de éstas.

Para la torre de telecomunicaciones es necesario localizar el punto exacto de la base de la torre y de los anclajes de los tensores. En la Figura 3.5 se presenta la ubicación de la base de la torre y de los anclajes de los tensores.

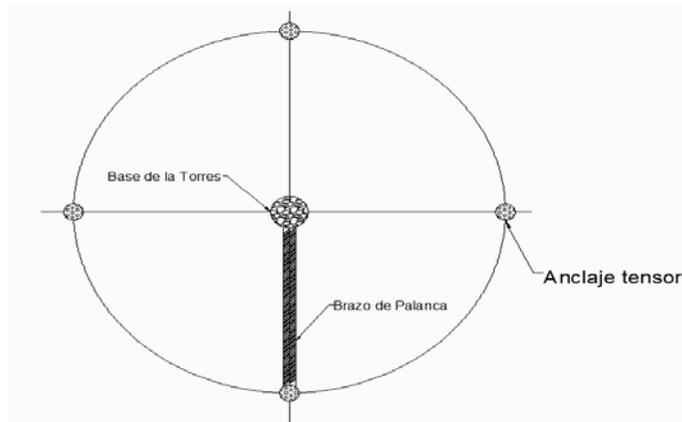


Figura 3.5 Vista en planta de la torre

Los anclajes de la torre se instalan “mirando” hacia la torre, como se muestra en la Figura 3.6, en donde se muestran diferentes alternativas de anclajes, para diferente tipo de terreno. La Figura 3.6a presenta el tipo de anclaje sugerido para un terreno blando (muy débil), en donde es necesario el empleo de una cimentación en cada una de los anclajes. En la Figura 3.6b se muestra la alternativa de anclaje para terreno firme, en donde no es necesaria la construcción de cimentación, y es posible anclar directamente en el clavo sobre el terreno. En ocasiones, en el suelo donde se quiere instalar la torre hay rocas de gran tamaño o es simplemente roca. Para ello existe un tipo de anclaje específico. En el caso de roca dura (como granito, basalto y roca que se no rompa con facilidad) se utilizan los tornillos de expansión (Figura 3.6c). Se instala el tornillo en la roca con algún elemento que sirva de enganche, como por ejemplo unos guardacabos. Existen distintos tipos de tornillos de expansión, y cada fabricante tiene su propio sistema de instalación.

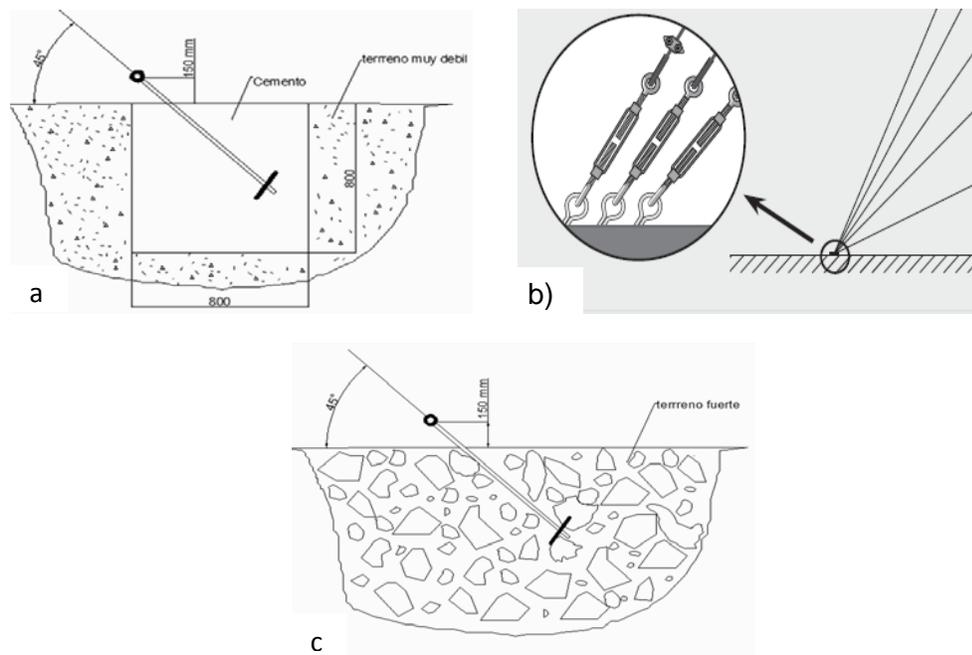


Figura 3.6 Diferentes tipos de anclajes: a) para terreno muy blando; b) para terreno firme; c) para terreno muy fuerte

3.2. Tipo de material de los elementos de la torre

El tipo de acero con el que se construyen las torres es el A36. La curva de su comportamiento se presenta en la figura 3.7.

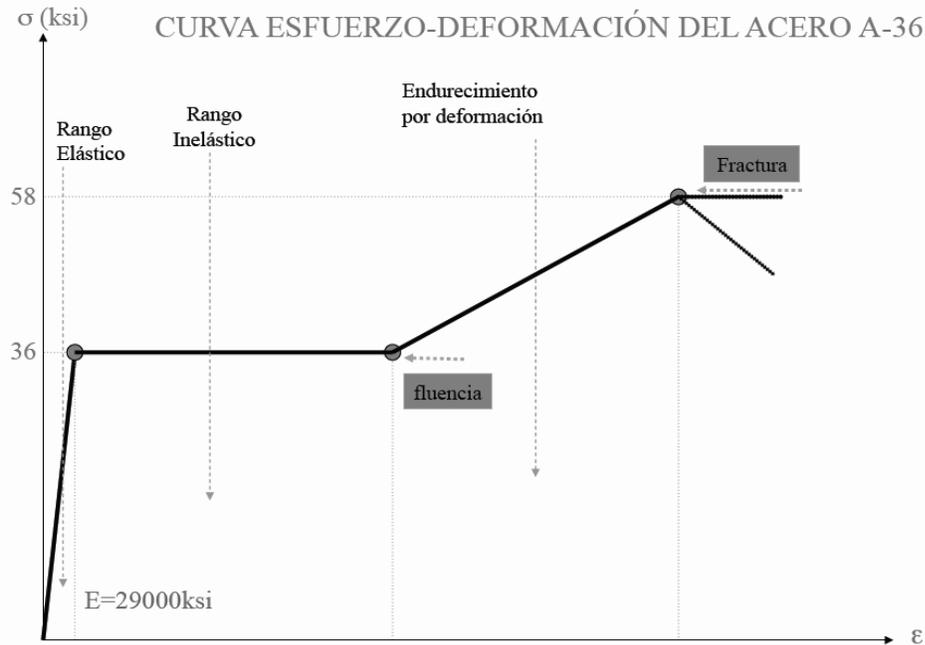


Figura 3.7 Curva esfuerzo-deformación del acero A36

En el rango elástico, al retirar la carga, el material regresa a su forma y tamaño inicial. En casi toda la zona se presenta una relación lineal entre la tensión y la deformación. Si la carga excede el límite elástico, el material se comporta plásticamente; es decir, continúa deformándose bajo una tensión "constante" o, en la que fluctúa un poco alrededor de un valor promedio llamado límite de cedencia o fluencia. Finalmente, la zona en donde el material retoma tensión para seguir deformándose; ésta se incrementa hasta el punto de tensión máxima, llamado por algunos tensión o resistencia última por ser el último punto útil del gráfico.

3.2.1. Cables de arriostamiento

Son miembros flexibles que pueden ser únicamente sometidos a tensión. Consisten en uno o más grupos de alambres, torones o cuerdas (Figura 3.8a). La carga de tensión se divide por igual entre los hilos del cable, permitiendo que cada hilo quede sometido a la misma tensión admisible. Un torón está formado de alambres dispuestos en forma helicoidal alrededor de un alambre central para producir una sección simétrica. De la misma manera, un cable es un grupo de torones colocados en forma helicoidal alrededor de un núcleo central que está compuesto de un corazón de fibras o de otro torón. El tipo de cable que se usa para arriostar las torres es un torón de 7 alambres (Figura 3.8b), que tiene un centro de un solo alambre con seis alambres del mismo diámetro alrededor.

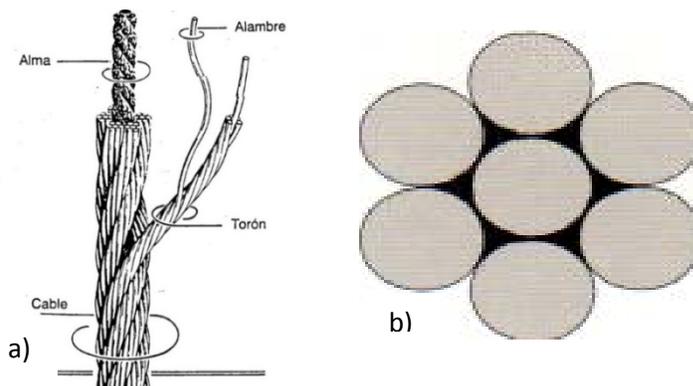


Figura 3.8 Elementos de un cable: a) cable; b) torón de 7 hilos

3.2.2. Secciones de acero

Para la modelación se emplearon elementos tubulares, ya que son adecuadas para resistir esfuerzos de compresión, torsión y flexión en los diferentes ejes.

Se emplearon diferentes tipos de barra de sección circular (ver Figura 3.9), para montantes verticales conforme al IMCA. Las propiedades de las secciones de acero se resumen en la Tabla 3.1

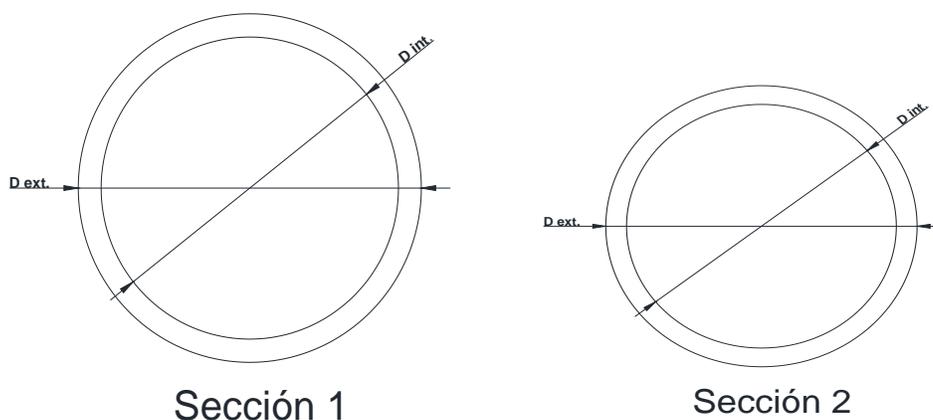


Figura 3.9 Tipo de secciones

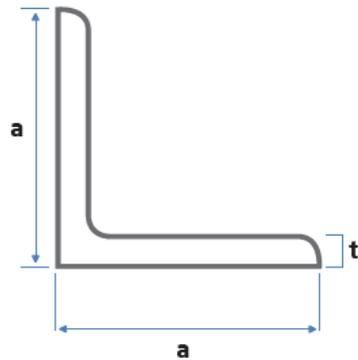
En la tabla 3.1 se presentan las propiedades de los elementos tubulares.

Tabla 3.1 Secciones circulares

D _{ext.} (cm)	D _{int.} (cm)	Espesor (mm)	Peso (Kg/m)	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)
4.8	3.8	5.08	5.41	6.90	16.33
6	4.9	5.54	7.48	9.53	36.09
7.3	5.9	7.01	11.41	14.53	80
8.9	7.4	7.62	15.27	19.46	162.09
10.2	9.0	5.74	13.57	17.29	199.27
11.4	9.7	8.56	22.32	28.44	400.03
14.1	11.2	9.53	30.97	39.45	860.73

Los ángulos de lados iguales tiene una rigidez considerablemente mayor que los cables, las varillas o las barras planas, pero pueden ser todavía muy flexibles si los miembros son de gran longitud, por lo tanto, los ángulos sencillos se usan principalmente para contraventeos, miembros a tensión en armaduras ligeras, en caso donde la longitud de los miembros no sea excesiva.

Para el modelo se emplearon ángulos de lados iguales (Figura 3.10) de arriostamiento horizontal e



inclinado de acero, $a=5\text{ cm}$ y $t=0.5\text{ cm}$.

Figura 3.10 Ángulo de lados iguales

3.3 Descripción del modelo matemático

La torre es arriostrada con sección en planta de tipo triangular equilátera como se muestra en la Figura 3.11.

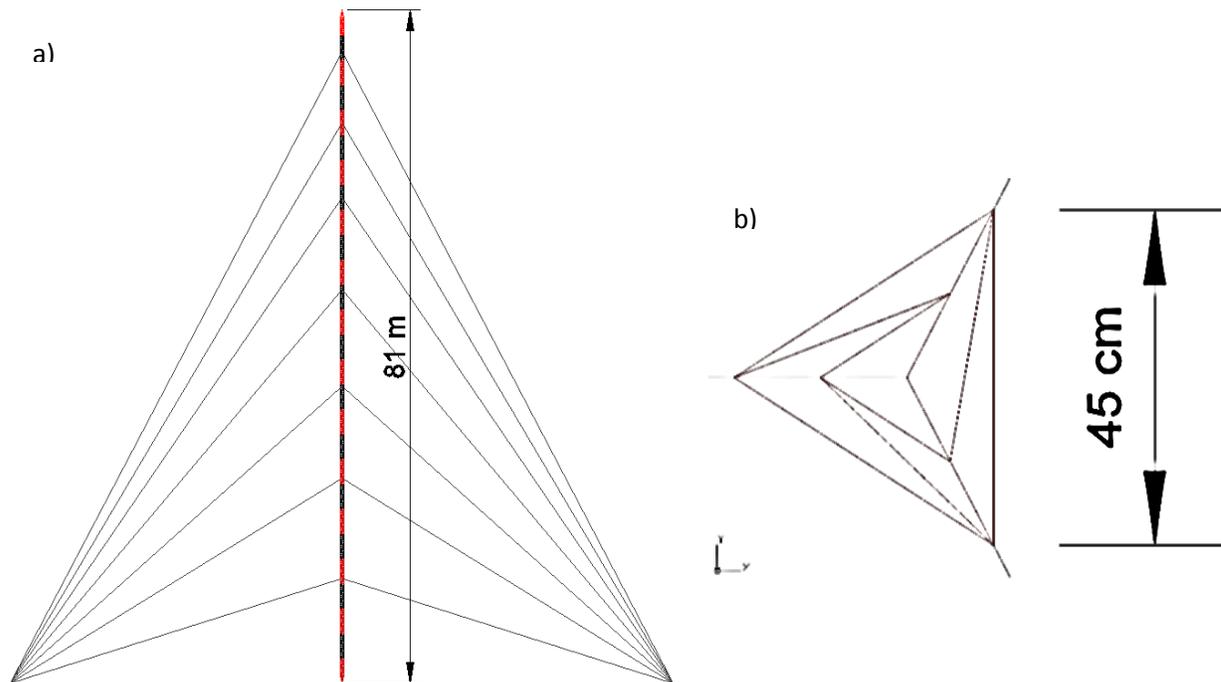


Figura 3.11 Vistas de la torre de telecomunicaciones: a) elevación; b) planta

El número total de elementos empleado en el modelo matemático se resume en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Elementos empleados en el modelo matemático de la torre

Tipo de elemento	Número de elementos
Ángulos	957
Barras tubulares (BT1)*	231
Barras tubulares (BT2)*	249
Total de elementos	1437
Cables	21

* BT1 y BT2 se refieren a propiedades asignadas a las barras.

Las longitudes de los cable empleados se muestran y resumen en las Figura 3.12 y en la Tabla 3.3.

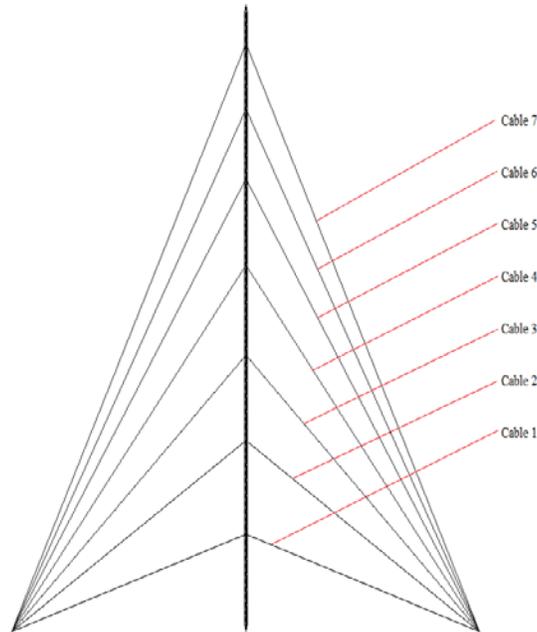


Figura 3.12 Identificación de cables

En la tabla 3.3 se muestran cada una de las longitudes de los cables.

Tabla 3.3 Longitudes de los cables

Cables	Longitud (m)
1	47.42
2	51.89
3	57.9
4	65.66
5	73.94
6	81.21
7	88.27

El límite máximo de tensión adoptado fue de $0.75 \sigma_{ult}$ donde σ_{ult} es el esfuerzo último del cable.

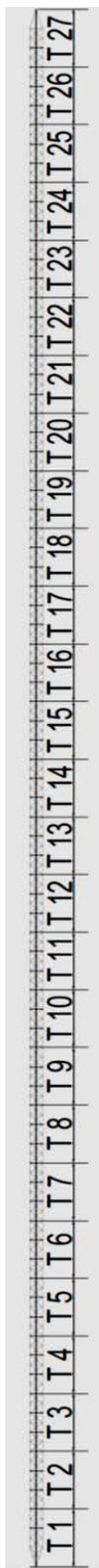


Figura 3.13 Identificación de tramos de la torre

Capítulo 4

DESCRIPCIÓN DE LOS ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1. Criterios adoptados para el diseño de las torres de telecomunicaciones

Para el diseño de las torres, primero se realizó un predimensionamiento ante peso propio más la tensión de los cables de los elementos resistentes. Una vez realizado el predimensionamiento, se aplicó la fuerza inducida por el viento (una velocidad del viento predefinida). Para la revisión de los elementos se empleó el módulo de diseño del programa SAP2000. Se consideró que los elementos fallaban por resistencia cuando el cociente de la capacidad a la resistencia excedía el 75% de su esfuerzo. El proceso anterior se realizó de forma iterativa con el fin de asociar diferentes velocidades del viento y el costo de la estructura de la torre.

Durante el proceso de análisis se restringió el desplazamiento máximo de la torre en su parte alta a un valor menor que $0.012H$. Lo anterior se consideró adecuado para evitar desplazamientos excesivos. Además, también se restringió el esfuerzo máximo de los cables y se verificó el nivel de tensado de éstos con la siguiente expresión:

$$\lambda^2 \leq 4\pi^2 \quad (4.1)$$

donde $\lambda^2 = \frac{\Gamma^2 \cos^2 \theta^2}{\varepsilon}$, y el resto de los parámetros se definen como:

$$\Gamma = \frac{mgL}{T} \quad \text{y} \quad \varepsilon = \frac{T}{EA}$$

donde:

m: Masa del cable.

g: Gravedad (9.81 m/s²)

L: Longitud del cable.

T: Tensión del cable.

A: Área del cable.

Debido a las características del elemento cable del programa SAP2000, que puede presentar grandes desplazamientos, se realizaron análisis estáticos no lineales.

4.2. Aplicación de las fuerzas inducidas por el viento en la torre

El procedimiento empleado para determinar las presiones y fuerzas de diseño se describió en la Sección 2.2.3.10 de este trabajo. En el Apéndice A se presentan los cálculos detallados para determinar los presiones y fuerzas de diseño. La siguiente tabla presenta un resumen de las velocidades de diseño, presiones y fuerzas para los tramos de una de las torres analizada.

Tabla 4.1 Velocidades de diseño, presiones y fuerzas para los tramos de una de las torres analizada

Tramo	VD (Km/h)	qz CD	Seccion	w (N/m)	Tramo	VD (Km/h)	qz CD	Seccion	w (N/m)
1	196.70	3413.71	diag	304.78	15	227.52	4567.18	diag	407.77
			vert	681.28				vert	815.53
			hor	304.78				hor	407.77
2	196.70	3413.71	diag	304.78	16	229.03	4627.88	diag	413.19
			vert	681.28				vert	826.37
			hor	304.78				hor	413.19
3	196.70	3413.71	diag	304.78	17	230.45	4685.53	diag	418.33
			vert	681.28				vert	836.67
			hor	304.78				hor	418.33
4	197.65	3446.85	diag	307.74	18	231.79	4740.44	diag	423.24
			vert	687.89				vert	846.47
			hor	307.74				hor	423.24
5	202.63	3622.70	diag	323.44	19	233.07	4792.88	diag	427.92
			vert	722.99				vert	855.84
			hor	323.44				hor	427.92
6	206.70	3769.54	diag	336.55	20	234.29	4843.10	diag	432.40
			vert	752.29				vert	864.80
			hor	336.55				hor	432.40
7	210.15	3896.31	diag	347.87	21	235.45	4891.30	diag	436.70
			vert	777.59				vert	873.41
			hor	347.87				hor	436.70
8	213.14	4008.29	diag	357.87	22	236.57	4937.64	diag	440.84
			vert	799.94				vert	881.68
			hor	357.87				hor	440.84
9	215.80	4108.86	diag	366.85	23	237.63	4982.29	diag	444.83
			vert	820.01				vert	889.66
			hor	366.85				hor	444.83
10	218.19	4200.36	diag	375.02	24	238.66	5025.37	diag	448.68
			vert	838.27				vert	897.35
			hor	375.02				hor	448.68
11	220.36	4284.42	diag	382.52	25	239.65	5067.01	diag	452.39
			vert	855.05				vert	904.79
			hor	382.52				hor	452.39
12	222.36	4362.29	diag	389.47	26	240.60	5107.30	diag	455.99
			vert	870.59				vert	911.98
			hor	389.47				hor	455.99
13	224.20	4434.91	diag	395.96	27	241.51	5146.35	diag	459.48
			vert	885.08				vert	918.95
			hor	395.96				hor	459.48
14	225.91	4503.01	diag	402.04					
			vert	804.08					
			hor	402.04					

Las fuerzas se aplicaron al modelo matemático en la dirección X, como se muestra en la siguiente figura:

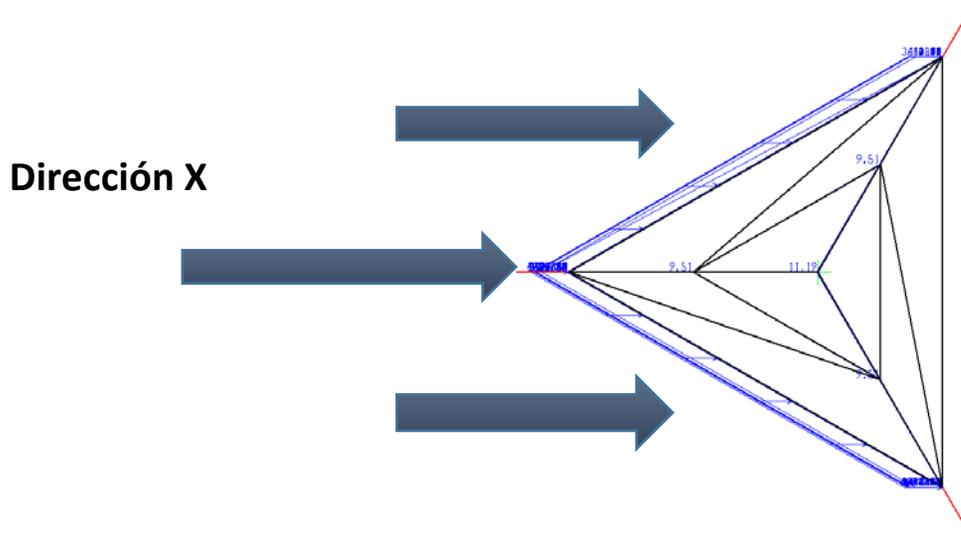


Figura 4.1 Aplicación de las fuerzas inducidas por el viento en una torre

4.3. Análisis de resultados

Para verificar el diseño de la torre, se empleó el código de colores del programa SAP2000, que se presenta en la siguiente figura.

Color	Elemento esforzado (%)
	0
	1 - 50
	50 - 70
	70 - 90
	90 - 100
	100

Figura 4.2 Código de colores para revisión de elementos resistentes

La figura 4.3 muestra los elementos menos esforzados de la torre ante la combinación de peso propio, tensión de los cables y las fuerzas inducidas por el viento, en color azul. Los elementos más esforzados se muestran en color rojo, lo que indica la falla del elemento.



Figura 4.3 Código de colores para revisión de elementos resistentes (se elimina parte de los cables para mejor visualización, éstos no son revisados con el código de colores)

Se observa en la figura anterior que la parte inferior de la torre es más propensa a fallar, como se esperaba, antes de los primeros cables de arriostramiento. Esto se debe a la combinación de los efectos del peso de la estructura, la fuerza que ejercen los cables y el efecto del viento. Los elementos de la parte baja de la torre están sometidos a fuerzas de compresión elevadas. Un acercamiento de la figura 4.3, se presenta en la figura 4.4.

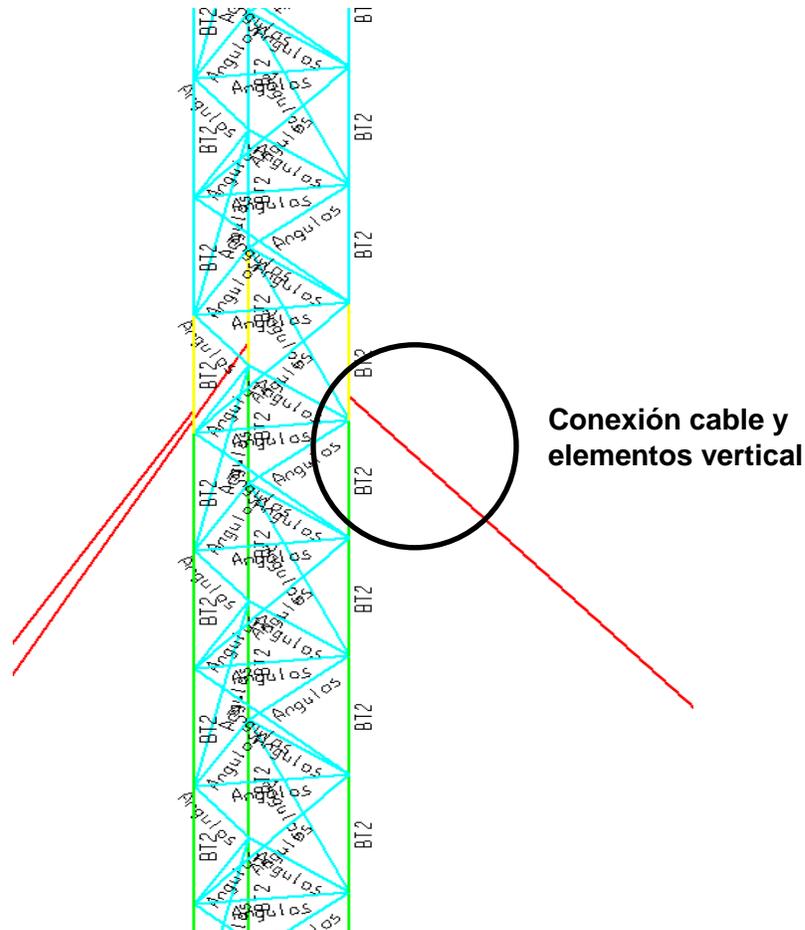


Figura 4.4 Acercamiento a la estructura de la torre mostrada en la Figura 4.2

Se observan en la Figura 4.4 zonas de concentración de esfuerzos en las conexiones de los cables con los elementos verticales. Esto se debe a la combinación de los efectos de la tensión del cable y la fuerza lateral inducida por el viento. Se observa también de la figura que los elementos diagonales trabajan a un nivel de esfuerzos relativamente bajo.

El comportamiento de falla descrito anteriormente se repitió en todas las torres analizadas. La tabla 4.1 resume algunos resultados de los análisis y en la Figura 4.5 se muestra la variación del desplazamiento en la parte alta de la torre.

Tabla 4.2 Resumen de resultados de las torres analizadas

Torre	Velocidad (km/h)	Sección (cm)	Espesor (mm)	Sección 2 (cm)	Espesor (mm)	Ángulo (cm)	Espesor (mm)	Díámetro del cable (mm)	Tensión del cable (N)	Desplazamiento (cm)
0	0	6	5.54	4.8	3.68	5	3	6	16000	0
1	30	6	5.54	4.8	3.68	5	3	6	16000	3.88
2	60	6	5.54	4.8	5.08	5	3	6	17000	17.15
3	80	6	5.54	4.8	5.08	5	3	6	19500	31.63
4	100	7.3	7.01	6	5.54	5	3	6	24500	40.19
5	120	8.9	7.62	7.3	7.01	5	3	6	31500	56.05
6	140	10.2	5.74	8.9	7.62	5	3	6	32500	71.5
7	160	10.2	5.74	8.9	7.62	5	3	10	27000	38.52
8	173	11.4	8.56	10.2	5.74	5	3	10	40055	72.38
9	180	11.4	8.56	10.2	5.74	5	3	10	40055	79.17
10	200	14.1	9.53	11.4	8.56	5	3	10	53000	94.77

Se observa en la tabla 4.2 que la máxima velocidad considerada en este trabajo fue de 200 km/h. También se observa el incremento de las secciones resistente conforme aumenta la velocidad del viento, como se esperaba.

Para visualizar mejor la variación de la velocidad del viento con el desplazamiento en la parte alta de la torre, la Figura 4.5 muestra la comparación de estas variables.

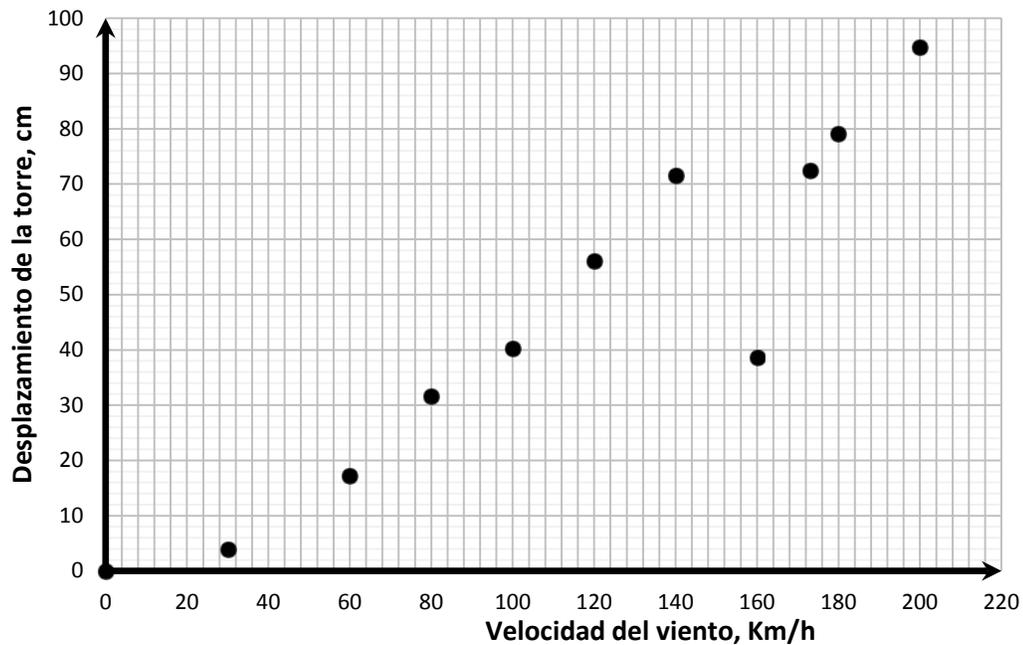


Figura 4.5 Desplazamiento en la parte alta de la torre

Se observa que los desplazamientos en la parte alta de la torre aumentan conforme aumenta la velocidad del viento. La disminución abrupta en el desplazamiento que se observa para la velocidad de 160 km/h se debe al aumento del diámetro del cable y al aumento en la tensión en éste, lo que restringe el desplazamiento de la torre.

Para determinar el costo de la torre asociado con cada velocidad del viento considerada se empleó la lista de precios actuales de la empresa Aceros Consolidada. La tabla 4.3 resume algunos de los costos propuestos por esta empresa.

Tabla 4.3 Resumen de algunos costos para la construcción de las torres

Tipo	Perfil (in)	Precio (t)
Ángulos	3/16"	\$12,200.00
Tubular	1 1/2"	\$15,300.00
	2	\$15,300.00
	2 1/2"	\$15,300.00
	3	\$15,300.00
	3 1/2"	\$15,300.00
	4"	\$15,300.00
	5"	\$15,300.00
Tipo	D (mm)	Precio (\$/m)
Cable 1	6	\$15.00
Cable 2	10	\$15.00

La tabla 4.4 presenta la cuantificación y costo del material de las torres analizadas. Es importante mencionar que los análisis sólo consideran el costo asociado con el material de construcción y la consideración de otro tipo de costo está fuera de los alcances del presente trabajo.

Tabla 4.4 Análisis de pesos y costos de las torres analizadas

Con base en la información de la tabla 4.4, se elaboró la siguiente figura 4.6 en la que se muestra la relación entre la velocidad del viento y el costo de la estructura (puntos de la

Torre	Viento (km/h)	Costo ángulos (\$)	Costo de tubo circular (\$)	Costo de cable (\$)	Peso Tubos (ton)	Peso Ángulos (ton)	Cable (m)	Costo total de la torre (\$)
0	0	12,200	15,300	15	1.2	1.2	1399	\$54,615.83
1	30	12,200	15,300	15	1.4	1.2	1399	\$57,314.81
2	60	12,200	15,300	15	1.5	1.2	1399	\$59,928.05
3	80	12,200	15,300	15	1.5	1.2	1399	\$59,928.05
4	100	12,200	15,300	15	2.3	1.2	1399	\$71,017.49
5	120	12,200	15,300	15	3.2	1.2	1399	\$85,630.52
6	140	12,200	15,300	15	3.5	1.2	1399	\$90,137.90
7	160	12,200	15,300	15	3.5	1.2	1399	\$90,137.90
8	173	12,200	15,300	15	4.3	1.2	1399	\$102,387.08
9	180	12,200	15,300	15	4.3	1.2	1399	\$102,387.08
10	200	12,200	15,300	15	6.4	1.2	1399	\$134,517.08

gráfica).

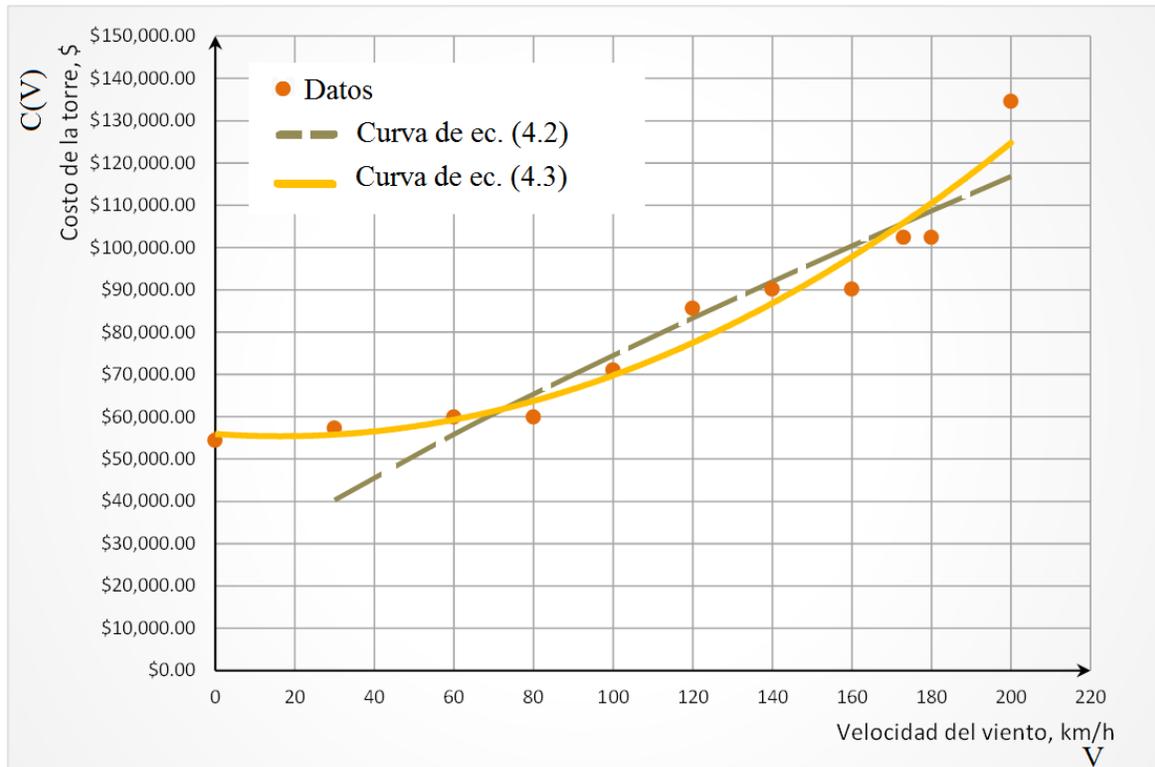


Figura 4.6 Grafica de Velocidad contra costo

Se observa de la figura 4.6 que, como se esperaba, el costo de la torre aumenta al aumentar la velocidad de diseño. El costo para una velocidad cero se asocia con el costo de la estructura cuando es diseñada para soportar sólo su peso propio y la tensión de los cables. En línea discontinua se muestra el ajuste con una forma funcional (ecuación (4.2)) similar a la empleada por la CFE para el desarrollo de velocidades óptimas de diseño por viento para el Manual de Obras Civiles para el Diseño por viento (2008) y en línea continua se muestra un ajuste con una curva polinómica (ecuación (4.3)).

$$C(V) = 30543.9 (1 + 0.0305(V - 15)^{0.87}) \quad (4.2)$$

$$C(V) = 2.056V^2 - 67.072V + 55934 \quad (4.3)$$

Las expresiones anteriores ofrecen una alternativa para determinar el costo de la torre de telecomunicaciones en función de la velocidad del viento, el empleo de ellas dependerá del criterio del diseñador.

CONCLUSIONES

Se realizó el análisis de una torre de transmisión atirantada ante los efectos del viento. Para la caracterización del viento se empleó el Manual de Obras Civiles de Diseño por Viento (MOCDV, 2008) de la Comisión Federal de Electricidad. Con base en los análisis se propusieron dos expresiones que relacionan el costo de la estructura y la velocidad de viento.

Más específicamente se concluye lo siguiente:

- En de suma importancia el efectos de los cables en la respuesta estructural de la torre, ya que éstos pueden sufrir grandes desplazamientos. Por lo anterior es necesario realizar un análisis no lineal para su estudio.
- Se observó que el efecto de las tensiones en los cables incrementaba de manera significativa el esfuerzo en los elementos barra y que éstos podían fallar, incluso antes de la aplicación de la carga de viento. Lo anterior se resolvió con un análisis iterativo en donde se buscó que los cables y las barras trabajaran de la manera más eficiente para resistir los efectos del viento.
- Para la determinación de las fuerzas de viento sobre la estructura, es necesaria la determinación de un factor de amplificación dinámica, el cual depende de las propiedades dinámicas de la estructura, que requieren de un análisis más especializado de la misma.
- Las expresiones desarrolladas que relacionan el costo y la velocidad del viento ofrecen una alternativa para determinar el costo de la torre de telecomunicaciones en función de la velocidad del viento, el empleo de ellas dependerá del criterio del diseñador.
- No existe normatividad para analizar los diferentes tipos de torres que se pueden construir, el análisis y diseño dependerá del criterio del diseñador.

RECOMENDACIONES

Al haber una gran variedad en el tipo de torres, y de los sitios en que éstas pueden ser ubicadas (edificaciones o terrenos), se recomienda el desarrollo de normatividades que regulen su construcción e instalación.

Para mejorar las actuales prácticas de construcción, se sugiere que CFE regule a las empresas privadas que se encargan del diseño estructural y de la instalación de la torres de telecomunicaciones. Aunado a lo anterior, la regulación debería validar la adecuada estructuración, incluyendo la cimentación y los cables (en el caso de torres arriostradas).

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Comisión Federal de Electricidad. **“Manual de diseño de obras civiles: Diseño por viento”**, México 2008.

Meseguer Ruiz José, **“Aerodinámica civil cargas del viento en las edificaciones”** edi. Mc Graw Hill/Interamericana de España, S.A.U 2001.

J.J. del Coz Díaz, P.J. García Nieto b, A. Lozano Martínez-Luengas a , J.L. Suárez Sierra a **“A study of the collapse of a WWII communications antenna using numerical simulations based on design of experiments by FEM”**, Engineering Structures, 19 September 2009.

Juárez Figueroa José, **“Diseño estructural de torres para telefonía celular”**, Tesis de Licenciatura, IPN, 2009.

Lista de precios, Aceros Consolidada, México, vigencia 2014.

Flores Mendoza Rigoberto, **“Estudio analítico del mecanismo de vibración inducido por el viento en los tirantes de un puente”**, Tesis de Maestría, 2011.

Siles Navarrete Hernán, **“Marco teórico el análisis de una tenso-estructura bajo la acción del viento”**, Tesis de Licenciatura, 2011.

Informe técnico, **“Comprensión del Análisis no lineal”**, Solid Works, 2011.

CENAPRED

APÉNDICE A. CÁLCULO DETALLADO DE LAS PRESIONES Y FUERZAS DEL VIENTO CON EL MOC (2008) DE LA CFE

La torre se divide en 27 tramos, cada una de 3 metros (columna 1 de la Tabla A1). En ellas contiene secciones tubulares (Verticales) (columna 11 de la Tabla A1) y ángulos de lados iguales (diagonales y horizontales) (columna 11 de la Tabla A1). En cada tramo la medida de los tubos es de 0.5 m, y en cada división se contienen ángulos en posición vertical y horizontal. La Z (columna 2 de la Tabla A1) es el promedio de cada tramo de la torre. La figura A1 presenta un tramo típico de la torre.

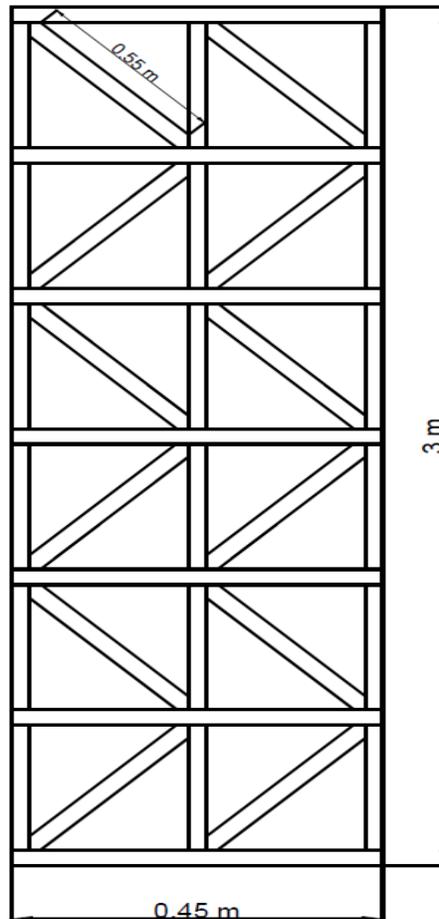


Figura A1. Tramo típico de la torre

- Determinación de velocidad de diseño

$$V_D = F_T F_{rz} V_R$$

Para eso necesitamos:

- a) Categoría del terreno
Categoría 1
- b) Velocidad regional (columna 5 de la Tabla A1)

Nuestra torre se encuentra localizada en Acapulco, Guerrero. Conforme al manual de CFE la velocidad regional en ese sitio es de 173 km/h

c) Factor de topografía (Ft) (columna 3 de la Tabla A1)

El terreno donde se encuentra es plano por lo que el factor de topografía es 1

d) Factor de exposición (columna 4 de la Tabla A1)

Se ocuparán las dos opciones que nos propone el manual de CFE, ya que la torre mide 81 m.
1.-de 0 a 10m

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

2.- de 10 a 81 m

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

Para 1 se toma Frz=c

$$\alpha=0.099 \quad \delta=245 \quad c=1.137$$

Por lo que Frz=1.137

Para 2 se calculó Frz igual con los siguientes datos:

Para z=10.5 m

$$\alpha=0.099 \quad \delta=245 \quad c=1.137$$

$$F_{rz} = 1.137 \left(\frac{10.5}{10} \right)^{0.099}$$

$$F_{rz} = 1.143$$

El procedimiento anterior se hace para las diferentes alturas.

e) Calculando la Velocidad de Diseño (columna 6 de la Tabla A1)

$$V_D = F_T F_{rz} V_R$$

$$V_D = (1)(1.137)(173) = 196.701 \text{ km/h}$$

f) Calcular la presión dinámica de base (columna 8 de la Tabla A1)

$$q_z = 0.047 G V_D^2$$

$$q_z = 0.047 G V_D^2 \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

Para esto necesitamos calcular el factor de corrección de temperatura y por altura con respecto al nivel del mar (columna 7 de la Tabla A1):

$$G = \frac{0.392 \Omega}{273 + \tau}$$

Donde:
 $T=27.9\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $\Omega=758.4\text{ mm de Hg}$

$$G = \frac{0.392(758.4)}{273 + 27.9}$$

$$G = 0.988$$

$$q_z = 0.047 (0.988)(196.701)^2 = 1796.69\text{ Pa}$$

El coeficiente de arrastre (columna 9 de la Tabla A1) se obtuvo de acuerdo con la expresión que se mostró en el capítulo uno, éste se obtiene con respecto a la porosidad de la estructura, la cual se determinó con el empleo de las siguientes áreas:

Área total de las barras (A1) = 0.342 m²

Área total de los ángulos en diagonal (A2) = 0.329 m²

Área total de los ángulos horizontales (A3) = 0.158 m²

Área total de todas los elementos (A1+A2+A3) = 0.828 m²

$$\delta = \frac{\text{área sólida}}{\text{área total}} = \frac{0.828}{(3 \times 0.45)} = 0.6135$$

El coeficiente de arrastre se obtuvo con ayuda de la Figura 2.4 para torres de sección triangular, y resultó igual a $C_D=1.9$ (columna 9 de la Tabla A1).

Para obtener las presiones de viento es necesario multiplicar el coeficiente de arrastre (C_D) con la presión dinámica de base (q_z) (columna 10 de la Tabla A1). Para esto también se necesita conocer el ancho de las secciones (columna 12 de la Tabla A1), las dimensiones ya se especificaron en las secciones anteriores. Éstas también son empleadas para determinar las presiones de viento ω (N/m) a lo largo del elemento (columna 13 de la Tabla A1).

Factor de amplificación dinámica (FAD)

Es la relación existente entre la amplitud de las vibraciones de un sistema de un grado de libertad sometido a una excitación de tipo armónico y el desplazamiento estático (cuando la carga es aplicada estáticamente).

La respuesta máxima en la dirección del viento está dada principalmente por la contribución del modo fundamental de vibrar, el cual tendrá signo constante. Por tanto, la contribución de los modos de vibrar superiores se considera despreciable.

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

en donde:

B^2 es el factor de respuesta de, adimensional.

$I_v(z_s)$ el índice de turbulencia a la altura de referencia,

R^2 el factor de respuesta en resonancia.

k_p el factor pico, adimensional

C_{RG} y C_G las constantes correctivas de la forma modal, adimensionales.

F_M el factor de corrección de la masa.

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

Este factor afecta a las presiones de viento (columna 14 de la Tabla A1). El FAD irá cambiando, dependiendo de las dimensiones de los elemento a utilizar y la velocidad regional, ya que el peso de la estructura y la frecuencia cambian.

Las características dinámicas para determinar el FAD para cada torre se obtuvieron con el empleo del programa SAP2000.

Tabla A1. Resumen del cálculo de las fuerzas inducidas por el viento sobre una de la torres de telecomunicaciones analizada

Tramo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
H	z	FT	Frz	VR (Km/h)	VD (Km/h)	G	qz (Pa)	CD	qz CD	Seccion	tw	w (N/m)	F	
1	3	1.5	1	1.14	173	196.70	0.99	1796.69	1.9	3413.71	diag	0.051	174.10	304.78
											vert	0.114	389.16	681.28
											hor	0.051	174.10	304.78
2	6	4.5	1	1.14	173	196.70	0.99	1796.69	1.9	3413.71	diag	0.051	174.10	304.78
											vert	0.114	389.16	681.28
											hor	0.051	174.10	304.78
3	9	7.5	1	1.14	173	196.70	0.99	1796.69	1.9	3413.71	diag	0.051	174.10	304.78
											vert	0.114	389.16	681.28
											hor	0.051	174.10	304.78
4	12	10.5	1	1.14	173	197.65	0.99	1814.13	1.9	3446.85	diag	0.051	175.79	307.74
											vert	0.114	392.94	687.89
											hor	0.051	175.79	307.74
5	15	13.5	1	1.17	173	202.63	0.99	1906.69	1.9	3622.70	diag	0.051	184.76	323.44
											vert	0.114	412.99	722.99
											hor	0.051	184.76	323.44
6	18	16.5	1	1.19	173	206.70	0.99	1983.97	1.9	3769.54	diag	0.051	192.25	336.55
											vert	0.114	429.73	752.29
											hor	0.051	192.25	336.55
7	21	19.5	1	1.21	173	210.15	0.99	2050.69	1.9	3896.31	diag	0.051	198.71	347.87
											vert	0.114	444.18	777.59
											hor	0.051	198.71	347.87
8	24	22.5	1	1.23	173	213.14	0.99	2109.63	1.9	4008.29	diag	0.051	204.42	357.87
											vert	0.114	456.94	799.94
											hor	0.051	204.42	357.87
9	27	25.5	1	1.25	173	215.80	0.99	2162.56	1.9	4108.86	diag	0.051	209.55	366.85
											vert	0.114	468.41	820.01
											hor	0.051	209.55	366.85
10	30	28.5	1	1.26	173	218.19	0.99	2210.71	1.9	4200.36	diag	0.051	214.22	375.02
											vert	0.114	478.84	838.27
											hor	0.051	214.22	375.02
11	33	31.5	1	1.27	173	220.36	0.99	2254.96	1.9	4284.42	diag	0.051	218.51	382.52
											vert	0.114	488.42	855.05
											hor	0.051	218.51	382.52
12	36	34.5	1	1.29	173	222.36	0.99	2295.94	1.9	4362.29	diag	0.051	222.48	389.47
											vert	0.114	497.30	870.59
											hor	0.051	222.48	389.47
13	39	37.5	1	1.30	173	224.20	0.99	2334.16	1.9	4434.91	diag	0.051	226.18	395.96
											vert	0.114	505.58	885.08
											hor	0.051	226.18	395.96
14	42	40.5	1	1.31	173	225.91	0.99	2370.01	1.9	4503.01	diag	0.051	229.65	402.04
											vert	0.102	459.31	804.08
											hor	0.051	229.65	402.04
15	45	43.5	1	1.32	173	227.52	0.99	2403.78	1.9	4567.18	diag	0.051	232.93	407.77
											vert	0.102	465.85	815.53
											hor	0.051	232.93	407.77
16	48	46.5	1	1.32	173	229.03	0.99	2435.73	1.9	4627.88	diag	0.051	236.02	413.19
											vert	0.102	472.04	826.37
											hor	0.051	236.02	413.19
17	51	49.5	1	1.33	173	230.45	0.99	2466.07	1.9	4685.53	diag	0.051	238.96	418.33
											vert	0.102	477.92	836.67
											hor	0.051	238.96	418.33
18	54	52.5	1	1.34	173	231.79	0.99	2494.97	1.9	4740.44	diag	0.051	241.76	423.24
											vert	0.102	483.52	846.47
											hor	0.051	241.76	423.24
19	57	55.5	1	1.35	173	233.07	0.99	2522.57	1.9	4792.88	diag	0.051	244.44	427.92
											vert	0.102	488.87	855.84
											hor	0.051	244.44	427.92
20	60	58.5	1	1.35	173	234.29	0.99	2549.00	1.9	4843.10	diag	0.051	247.00	432.40
											vert	0.102	494.00	864.80
											hor	0.051	247.00	432.40
21	63	61.5	1	1.36	173	235.45	0.99	2574.37	1.9	4891.30	diag	0.051	249.46	436.70
											vert	0.102	498.91	873.41
											hor	0.051	249.46	436.70
22	66	64.5	1	1.37	173	236.57	0.99	2598.76	1.9	4937.64	diag	0.051	251.82	440.84
											vert	0.102	503.64	881.68
											hor	0.051	251.82	440.84
23	69	67.5	1	1.37	173	237.63	0.99	2622.26	1.9	4982.29	diag	0.051	254.10	444.83
											vert	0.102	508.19	889.66
											hor	0.051	254.10	444.83
24	72	70.5	1	1.38	173	238.66	0.99	2644.93	1.9	5025.37	diag	0.051	256.29	448.68
											vert	0.102	512.59	897.35
											hor	0.051	256.29	448.68
25	75	73.5	1	1.39	173	239.65	0.99	2666.85	1.9	5067.01	diag	0.051	258.42	452.39
											vert	0.102	516.83	904.79
											hor	0.051	258.42	452.39
26	78	76.5	1	1.39	173	240.60	0.99	2688.06	1.9	5107.30	diag	0.051	260.47	455.99
											vert	0.102	520.95	911.98
											hor	0.051	260.47	455.99
27	81	79.5	1	1.40	173	241.51	0.99	2708.61	1.9	5146.35	diag	0.051	262.46	459.48
											vert	0.102	524.93	918.95
											hor	0.051	262.46	459.48