



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**DISEÑO ÓPTIMO DE EDIFICIOS SENSIBLES AL  
VIENTO, CONSIDERANDO FORMULACIONES  
SIMPLIFICADAS DE DAÑO**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS  
P R E S E N T A :

**ISAAC F. LIMA CASTILLO**

DIRECCIÓN DE TESIS:  
**DR. ADRIÁN POZOS ESTRADA**  
**DR. ROBERTO GÓMEZ MARTÍNEZ**

Noviembre del 2012



**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM**

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: **Dr. Escobar Sánchez José Alberto**

Secretario: **Dr. Pozos Estrada Adrián**

Vocal: **Dr. Gómez Martínez Roberto**

1<sup>er</sup>. Suplente: **M. I. Mendoza Escobedo Carlos Javier**

2<sup>do</sup>. Suplente: **Dr. Díaz López Orlando Javier**

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

**TUTORES DE TESIS:**

**DR. ADRIÁN POZOS ESTRADA Y DR. ROBERTO GÓMEZ MARTÍNEZ**

## Agradecimientos

A mi padre Manuel Humberto Lima M.†  
a quien siempre llevo en mi corazón.  
Gracias por enseñarme a ser constante  
para alcanzar todas mis metas.  
Siempre te extraño.

A mi mamá, Ma. del Carmen Castillo M. De  
quien he recibido una gran cantidad de cariño,  
este extraordinario sentimiento me ha servido  
para que todos los días supere los momentos  
difíciles.

A mis hermanos, Manuel, Flor, Yuri,  
Carlos e Iliana, por estar siempre conmigo y  
brindarme su apoyo incondicional.

A mis sobrinos Mario, Adrian, Alonso,  
Yuri y Emiliano, por ser combativos y  
entusiastas en todos sus retos.

Al Dr. Gómez:  
Por estar comprometido siempre con la excelencia

Al Dr. Pozos:  
Por impulsarnos a dar el máximo

Al Dr Escobar:  
Por enseñarnos dentro  
y fuera de las aulas que la tenacidad  
tiene su recompensa.

A la UNAM de quien aprendí que:  
“Por mi raza hablará el espíritu”

A mis profesores quienes me brindaron los  
conocimientos necesarios para cumplir  
mi compromiso profesional con la sociedad.

A los camaradas de la generación 2011

A los camaradas de Mecánica Aplicada

**¡Gracias!**



## **RESUMEN**

Actualmente en nuestro país, para el diseño óptimo de estructuras sometidas al viento se han adoptado expresiones, las cuales originalmente fueron desarrolladas para estructuras sometidas a eventos sísmicos. Por lo que es necesario verificar o generar expresiones que capturen en su totalidad la naturaleza de la excitación actuante y estén relacionadas directamente con el costo de la estructura, ya sean elementos estructurales y no estructurales. Para la verificación, se elaborarán modelos matemáticos de estructuras diseñándolos ante diferentes solicitaciones de viento y se obtendrán los costos de diseño asociados. Lo anterior permitirá correlacionar las velocidades del viento de diseño con el costo de todos los elementos de la estructura, y así proponer una función de costo que considere de manera explícita el efecto del viento. Se utilizan modelos con características idénticas a estructuras ubicadas en las costas mexicanas. Las implicaciones de los análisis se discuten extensamente.

## **ABSTRACT**

Currently in our country, for the optimal design of structures subjected to wind forces expressions have been adopted, which were originally developed for structures subjected to seismic events. For this reason it is necessary to verify or generate expressions that capture fully the nature of the excitation acting and that relate to the cost of the structure, both structural and non-structural elements. For verification, mathematical models of structures are developed and subjected to wind forces, and the design costs are obtained. This will allow us to correlate the design wind speeds at the cost of the elements of the structure, in order to propose a cost function that explicitly considers the effect of wind. These models have used characteristics identical to structures located on the Mexican coast. The implications of the analysis are discussed extensively.

# Contenido

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES .....</b>	<b>3</b>
1.1. CONCEPTOS BÁSICOS .....	3
1.1.1. Características del viento .....	3
1.2. INTERACCIÓN DEL VIENTO CON LAS ESTRUCTURAS.....	4
1.2.1. Efectos dinámicos .....	4
1.2.1.1. Efectos aeroelásticos .....	5
1.2.1.2. Desprendimiento de torbellinos .....	5
1.2.1.3. Galope inducido por una estela .....	6
1.2.1.4. Bataneo.....	7
<b>CAPÍTULO 2. DISEÑO ÓPTIMO.....</b>	<b>11</b>
2.1 EFECTOS EN LAS ESTRUCTURAS DEBIDAS A VIENTOS EXTREMOS .....	11
2.1.1 Identificación y determinación del daño .....	14
2.1.1.1. Efectos generales.....	15
2.1.1.2. Efectos locales.....	15
2.1.1.3. Daño binario.....	16
2.2 COSTO ESPERADO.....	17
2.3 COSTO DE LA ESTRUCTURA.....	17
Tiempo de estimado.....	18
2.4 COMPARACIÓN DE REGLAMENTOS PARA DISEÑO POR VIENTO .....	19
2.4.1. Consideraciones generales .....	19
2.4.2. Edificios rígidos y flexibles .....	19
2.4.3. Comparación de expresiones empleadas en el diseño estático de edificios sujetos al viento.....	20
2.4.3.1. Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento, de la Comisión Federal de Electricidad (CFEDV).....	20
2.4.3.2. Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF 2004) y las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento (NTCDV 2004).....	20
2.4.3.3. American Society of Civil Engineers, ASCE (2002).....	21
2.4.3.4. Wind Load Provisions, National Building Code of Canada (NBCC 1995).....	21
2.4.3.5. Comentarios a las expresiones de diseño por viento, que corresponden para realizar un análisis estático. ....	22

2.4.4.	Análisis dinámico.....	24
2.4.4.1.	Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF, 2004) y Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento (NTCDV, 2004).....	24
2.4.4.2.	Manual de la Comisión Federal de Electricidad Diseño por viento (CFEDV, 2008)	25
2.4.4.3.	American Society of Civil Engineers, ASCE (2002).....	25
2.4.4.4.	Wind Load Provisions, National Building Code of Canada (NBCC 1995).....	26
2.4.4.5.	Comentarios a las expresiones de diseño por viento, para realizar un análisis dinámico.....	27
<b>CAPÍTULO 3. PROPUESTA PARA OBTENER LA VELOCIDAD ÓPTIMA.....</b>		<b>29</b>
3.1	DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS EN ESTUDIO.....	29
3.1.1.	Modelo 1 "Torre Cancún".....	29
3.1.2.	Modelo 2 "SIS ACAPULCO".....	31
3.1.3.	Modelo 3 "B'LAM Cancún".....	32
3.1.4.	Modelo 4 "Punta Ixtapa".....	34
3.1.5.	Modelo 5 "Torre Nautilus".....	36
3.2.	PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS.....	38
3.2.1.	Datos de los modelos.....	38
3.2.2.	Diseño y análisis inicial de la estructura.....	39
3.2.2.1.	Cálculo del costo inicial de la estructura, $C_{VR=0}$ .....	39
3.2.2.2.	Diseño de los modelos con el Manual de la Comisión Federal de Electricidad para Diseño por Viento.....	40
3.3.	ANÁLISIS ESTÁTICO.....	41
3.3.1.	Características de los modelos.....	41
3.3.1.1.	Edificios rígidos y flexibles.....	41
3.3.1.2.	Clasificación de las estructuras según su respuesta ante la acción del viento.....	41
3.3.1.3.	Clasificación de la estructura de acuerdo con el grupo, tipo y características del terreno.....	42
3.3.1.4.	Cálculo de las fuerzas de viento con base en el Manual CFEDV(2008).....	42
3.3.1.5.	Cálculo de la velocidad media ( $V_D$ ).....	42
3.3.1.6.	Cálculo de la presión dinámica de base $q_z$ .....	43
3.3.1.7.	Cálculo de la presión actuante sobre la estructura.....	44
3.3.1.8.	Fuerza sobre construcciones cerradas.....	45
3.3.1.9.	Presiones exteriores.....	46
3.3.1.10.	Presiones interiores.....	46

3.4.	ANÁLISIS DINÁMICO .....	47
3.4.1.	Fuerza equivalente .....	47
3.4.2.	Cálculo del factor de amplificación dinámica, $F_{AD}$ .....	48
3.4.3.	Revisión de los desplazamientos.....	48
3.4.4.	Cálculo del peso de la estructura.....	49
3.4.5.	Cálculo del peso ( $w_{i+1}$ ) de la estructura para una velocidad regional $V_R=170$ km/h..	49
3.4.6.	Cálculo del costo de la estructura para una velocidad de diseño de $V_R=170$ km/h...	50
3.4.7.	Velocidad de viento vs costo de la estructura .....	50
3.4.8.	Cálculo del costo de las pérdidas para la velocidad de diseño $V_R=170$ km/h.....	51
3.4.9.	Procedimiento para obtener la velocidad regional del viento .....	52
3.4.10.	Evaluación del daño .....	54
3.4.11.	Probabilidad de falla ( $P_{fA}$ ).....	54
3.4.12.	Costo del ciclo de vida .....	55
3.4.13.	Velocidad óptima de diseño.....	55
	<b>CAPÍTULO 4. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO .....</b>	<b>58</b>
4.1	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO.....	58
4.2	CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS .....	58
4.3	DISEÑO Y ANÁLISIS INICIAL DE LA ESTRUCTURA .....	58
4.3.1.	Cálculo del costo inicial de la estructura ( $CVR=0$ ).....	59
4.4	DISEÑO DE LA ESTRUCTURA .....	60
4.4.1.	Análisis Estático.....	60
4.4.2.	Clasificación de las estructuras de acuerdo al grupo, tipo y características del terreno	61
4.4.3.	Cálculo de las fuerzas de viento.....	62
4.4.4.	Cálculo de la velocidad media (VD).....	63
4.4.5.	Cálculo de la presión dinámica de base $q_z$ .....	63
4.4.6.	Cálculo de la presión actuante sobre la estructura .....	64
4.4.7.	Fuerza sobre construcciones cerradas.....	65
4.4.8.	Presiones interiores .....	65
4.4.9.	Fuerzas estáticas en la cara de barlovento.....	66
4.4.10.	Cálculo del factor de amplificación dinámica FAD.....	67
4.4.11.	Revisión de los desplazamientos.....	67
4.5	PROCEDIMIENTO PARA OBTENER LA VELOCIDAD ÓPTIMA .....	68
4.5.1.	Cálculo del peso de la estructura para $V_R=170$ km/h y el factor $I$ .....	68
4.5.2.	Cálculo del costo ( $CVR=170$ ) de la estructura para una velocidad de diseño $V_R=170$	

km/h .....	69
4.5.3. Cálculo del costo de las pérdidas para la velocidad de diseño.....	70
4.5.4. Cálculo de los parámetros $u$ y $\alpha$ .....	70
4.5.5. Evaluación del daño para diferentes velocidades de viento.....	71
4.5.6. Cálculo de la probabilidad de daño para diferentes velocidades de viento.....	72
4.5.7. Cálculo del costo total de la estructura .....	73
4.5.8. Estimación de la velocidad óptima regional .....	75
4.5.9. Comparación de resultados .....	78
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES.....</b>	<b>80</b>
5.1 CONCLUSIONES .....	80
5.2 RECOMENDACIONES.....	82

## NOTACIÓN

$A_z$  área de la estructura, o parte de ella, sobre la que actúa la presión de diseño.

$B$  factor de excitación de fondo (NTCDV 2004).

$B^2$  factor de respuesta de fondo.

$C_o$  representa el costo inicial de la estructura.

$C_{VD=170}$  costo de la estructura para  $V_D=170$  km/h.

$C_{VD=0}$  costo de la estructura para  $V_D=0$  km/h.

$C_e$  coeficiente de exposición que refleja los cambios en la velocidad de viento con la altura y las variaciones alrededor del terreno.

$C_g$  factor de ráfaga.

$C_e$  factor correctivo por exposición.

$C_f$  costo final

$C_g$  coeficiente de ráfaga.

$C_p$  coeficiente local de presión, que depende de la forma de la estructura.

$C_p$  coeficiente de presión.

$C_{pi}$  coeficiente de presión interior.

$C_{pe}$  coeficiente de presión exterior.

$c$  coeficiente de escala de rugosidad, adimensional.

$C_{pe}$  coeficiente de presión interior.

$E(C_T(V_{d,t}^2))$  costo esperado del ciclo de vida de la estructura.

$F$  relación de energía en ráfaga.

$F_{AD}$  factor de amplificación dinámica.

$F_T$  factor de topografía local.

$F_{Tz}$  factor de exposición local.

$F_{es}$  fuerza estáticas resultantes del viento que actúa perpendicularmente sobre las superficies o elementos estructurales de la construcción.

$F(x)$  probabilidad de excedencia.

$f_{rx}, f_{ry}, f_{rz}$  fuerzas debidas al rozamiento en las tres direcciones principales (fuerzas viscosas).

$G$  factor de corrección por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar, adimensional. (CFEDV 2008)

$G$  factor de ráfaga (ASCE)

$G$  factor de amplificación dinámica (NTCDV 2008).

$G_f$  factor de efecto de ráfaga para los sistemas principales resistentes a fuerza de viento de edificaciones flexibles y otras estructuras.

$G_g$  coeficiente de ráfaga.

$g_Q$  factor pico o máximo para respuesta de entorno.

$g_R$  factor pico o máximo para respuesta resonante.

$g_v$  factor pico o máximo para respuesta de viento.

$g_P$  coeficiente que incluye los máximos efectos de carga.

$g$  gravedad de la tierra. (ecuaciones de movimiento)

$g$  factor de respuesta máxima (RCDF 2004 y NTCDV 2004).

$I$  factor de incremento del costo.

$I_{\bar{z}}$  intensidad de turbulencia.

$I_v(Z_s)$  índice de turbulencia, evaluado a la altura de referencia,  $Z_s$ .

$k_p$  factor pico.

$K_A$  factor de reducción de presión por tamaño de área.

$k_p$  factor pico.

$N_i$  número veces que se presenta el daño.

$N_T$  número del tamaño de la muestra.

$P$  presión de viento para edificios altos.

$P$  presión o succión estática, actuando en dirección normal a la superficie.

$P_i$  factor de presión local.

$P_e$  presión exterior.

$P_i$  presión interior.

$P_{fA}$  probabilidad de que el estado límite de servicio sea excedido.

$P_n$  presión neta.

$P_z$  presión de diseño que ejerce el flujo del viento sobre una construcción determinada (RCDFDV).

$p_z$  presión actuante sobre la construcción determinada.

$P_z$  presión de diseño a la altura  $z$ .

$P_z$  presión de diseño.

$Q$  factor de proporcionalidad de las pérdidas económicas, para el estado límite de servicio, se tomará igual a 15.

$Q$  factor de respuesta de entorno de la Ecuación.

$q_h$  presión de la velocidad del viento evaluada a altura  $z = h$ , en  $N/m^2$  ( $lb/ft^2$ ).

$q$  presión de velocidad.

$q_z$  presión dinámica de base del viento.

$R$  factor de rugosidad (NTCDV 2004).

$R^2$  factor de respuesta de resonancia (ASCE)

$R$  factor de respuesta de resonancia. (CFEDV 2008)

$S$  factor reductivo por tamaño.

$T_{r1}$  Periodo de retorno para 50 años (CFEDV 2008).



$T_{r2}$  Periodo de retorno para 200 años (CFEDV 2008).

$t$  tiempo de servicio para 50 años.

$V_z$  velocidad de diseño a la altura  $Z$ .

$V_d$  velocidad básica de diseño, en km/h.

$V_R$  velocidad regional.

$V_D$  velocidad media de diseño.

$V_{Tr=50}$  velocidad para un periodo de retorno de 50 años (CFEDV 2008).

$V_{Tr=200}$  velocidad para un periodo de retorno de 200 años (CFEDV 2008).

$w_{i+1}$  peso de la estructura con una velocidad de diseño  $V_D=170$  km/h.

$w_1$  peso de la estructura con una velocidad de diseño  $V_D=0$  km/h.

$x$  velocidad del viento.

$Z_s$  altura de referencia en función de la forma que se contempla en el análisis dinámico.

$Z$  altura por encima del terreno natural, a la cual se desea conocer la velocidad de diseño, en m.

$Z_s$  altura de referencia en función de la forma que se contempla en el análisis dinámico.

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

$\alpha$  y  $u$  valores de acuerdo a la probabilidad de excedencia.

$\beta$  fracción de amortiguamiento crítico, igual a 0.01 en estructuras de acero, y 0.02 en estructuras de concreto.

$\gamma$  tasa de descuento que es igual a 5%.

$\Delta_{m\acute{a}x.}$  desplazamiento máximo.

$\delta$  altura medida a partir del nivel del terreno de desplante, por encima de la cual la variación

de la velocidad del viento no es importante y puede suponerse constante; a esta altura se le conoce como altura gradiente; en m.

$\tau$  temperatura ambiental, en °C.

$\lambda$  latitud.

$\mu$  factor de los efectos promedio de la carga.

$u, v$  y  $w$  componentes cartesianas del vector velocidad.

$\partial p$  gradiente vertical de presión.

$\sigma$  promedio de la raíz al cuadrado de los efectos de carga.

$\rho$  densidad del aire.

$x, y, z,$  sistema de referencia.

$\Omega$  presión barométrica, en mm de Hg.

$\Omega$  velocidad angular de la tierra (ecuaciones de movimiento).

# INTRODUCCIÓN

En la historia de la humanidad existe una tendencia a construir proyectos cada vez más ambiciosos, edificios más altos, estructuras con formas caprichosas e irregulares o cubrir claros más grandes. Esta tendencia por llevar a la ingeniería al límite, ha provocado que los investigadores desarrollen metodologías que permitan, al calculista así como al constructor, diseñar y construir proyectos que cumplan con los requisitos de seguridad, y que permanezcan en funcionamiento, aún y cuando se presente un evento de magnitud importante.

En este trabajo se propone una metodología para encontrar velocidades óptimas con la que se pueden diseñar estructuras resistentes a los efectos del viento, tomando en cuenta el costo de los elementos estructurales y no estructurales, así como el daño en la estructura.

Los antecedentes y definiciones necesarias para el desarrollo de este trabajo se presentan en los capítulos 1 y 2.

En el capítulo 3 se presenta con detalle el problema a resolver y también se hace una breve introducción de los reglamentos de diseño para estructuras sometidas al viento. Se hacen comentarios con respecto a sus limitaciones en referencia al diseño óptimo.

La solución al problema planteado en el capítulo 3 se presenta en el capítulo 4 en el cual se muestran los resultados de los análisis realizados y se proponen valores óptimos de velocidades de diseño del viento con la metodología desarrollada. También se hacen

comparaciones de los resultados obtenidos con los establecidos en códigos o manuales de diseño comúnmente empleados en México.

Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones surgidas a partir del presente estudio.

# CAPÍTULO 1

## ANTECEDENTES

### 1.1. CONCEPTOS BÁSICOS

#### 1.1.1. Características del viento

El viento es el desplazamiento horizontal de las masas de aire, causado por las diferencias de presión atmosférica, atribuidas a la variación de temperatura sobre las diversas partes de la superficie terrestre. Su origen es la combinación de dos características del planeta: la primera es que la Tierra tiene una forma esférica, y la segunda es que los rayos del sol generan mayor temperatura en la zona del Ecuador y menor hacia los polos, dando origen a cambios de presión.

El movimiento del viento está determinado por cuatro fuerzas que se interrelacionan, de tal forma que al involucrarse generan el movimiento. Dos de estas fuerzas son las de gravedad y las diferencias de presión entre latitudes, las cuales provocan el desplazamiento natural de las masas de aire.

Por otra parte, tenemos que, debido al movimiento de la tierra se genera un movimiento rotacional llamado fuerza centrífuga y otro conocido como la fuerza de Coriolis.

Las cuatro fuerzas anteriores generan el movimiento de las masas de aire que circulan en la atmósfera. Estas fuerzas se interrelacionan en las ecuaciones de movimiento de un elemento fluido, para las tres direcciones principales (i.e.,  $x$ ,  $y$  y  $z$ ), de la manera siguiente:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{\partial p}{\rho \partial x} - 2\Omega(w \cos \lambda - v \sin \lambda) + f_{rx} \quad (1a)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{\partial p}{\rho \partial y} - 2\Omega u \sin \lambda + f_{ry} \quad (1b)$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{\partial p}{\rho \partial z} - 2\Omega u \cos \lambda + f_{rz} - g \quad (1c)$$

donde:

$u, v$  y  $w$  componentes cartesianas del vector velocidad

$\Omega$  velocidad angular de la tierra

$\partial p$  gradiente vertical de presión

$\rho$  densidad del aire

$x, y, z$ , sistema de referencia

$\lambda$  latitud

$g$ : gravedad de la tierra

$f_{rx}, f_{ry}, f_{rz}$  fuerzas debidas al rozamiento en las tres direcciones principales (fuerzas viscosas)

Las fuerzas que intervienen en la ecuación (1) son muy importantes y soluciones exactas sólo se obtienen bajo condiciones casi ideales. La interacción entre éstas define los efectos que un obstáculo inmerso en el fluido podría experimentar, como es el caso de las estructuras civiles.

## 1.2. INTERACCIÓN DEL VIENTO CON LAS ESTRUCTURAS

### 1.2.1. Efectos dinámicos

Se deben a vibraciones en la dirección del viento, debidas a la variación de su velocidad, o causadas por corrientes de aire que se generan debido a obstáculos (efectos de golpe de viento).

También se presentan vibraciones en dirección ortogonal al viento, ya sean forzadas como consecuencia del desprendimiento de remolinos, o autoexcitadas, las que dependen fuertemente de la movilidad de la estructura, (Hernández, et al, 2005).

#### **1.2.1.1. Efectos aeroelásticos**

Los efectos aeroelásticos son aquellos que se presentan cuando el viento altera el estado estático de la estructura, y puede llegar a ser crítico en función del ángulo de incidencia, la geometría, el periodo de vibración y la longitud o altura de la estructura. Estos efectos, producen fuerzas, las cuales tienen que estar consideradas en el diseño de los elementos.

No debemos olvidar que alrededor de cada estructura, podrían existir otras que mitiguen o incrementen los efectos aeroelásticos.

#### **1.2.1.2. Desprendimiento de torbellinos**

Una vez que la corriente del viento incide sobre un objeto sensible a las fuerzas de viento, se generan un desprendimiento alternado y periódico de torbellinos, la denominada calle de torbellinos de Von Kármán (Simiu y Scanlan, 1996).

El desprendimiento de vórtices o torbellinos depende del tipo de geometría, rigidez y altura de la estructura sobre la que actúan o se desprenden. Los torbellinos provocan fuerzas laterales

perpendiculares a la dirección del viento. La Figura 1.1 muestra vórtices desprendidos por el paso del viento sobre una isla.



**Figura. 1.1. Vórtices de Von Karman (fotografía tomada por la NASA de la isla Socorro en México, 16 de mayo de 1992)**

Se ha demostrado que los efectos de más interés para la ingeniería civil, debido a los desprendimientos de torbellinos, son los que provocan un efecto de succión sobre el contorno de la estructura. Esto puede producir un aumento de succión instantáneo en un área pequeña de la fachada (Pindado, 2003), por lo que se tiene que tomar en cuenta en los anclajes de los elementos de fachada.

### **1.2.1.3. Galope inducido por una estela**

Cuando encontramos un grupo de estructuras a cierta distancia, se puede presentar un efecto debido a la estela que deja una estructura detrás de la otra, y al variar el ángulo de ataque pueden incrementarse los efectos. La distancia que existe entre ellas es un parámetro a considerar en el diseño.

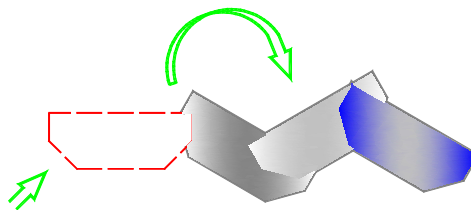
Los cables de líneas de transmisión son susceptibles de este fenómeno. Cabe destacar que sólo puede ocurrir cuando las frecuencias propias del cable situado corriente abajo son bajas en



comparación con las frecuencias de desprendimiento de torbellinos, tanto suyas como del obstáculo situado corriente arriba, (Meseguer Ruiz et al, 2001).

#### **1.2.1.4. Bataneo**

Existen dos tipos, cuando el viento turbulento incide en una estructura o el conocido con el nombre de bataneo de estela o interferencia. El primero genera una vibración aleatoria, lo que provoca incomodidad en los usuarios, pero no necesariamente el colapso de la estructura (ver Tabla 1.1 y Figura 1.3). El segundo es provocado por la estela de otro obstáculo situado corriente arriba del primero, como se muestra en la Figura 1.2.

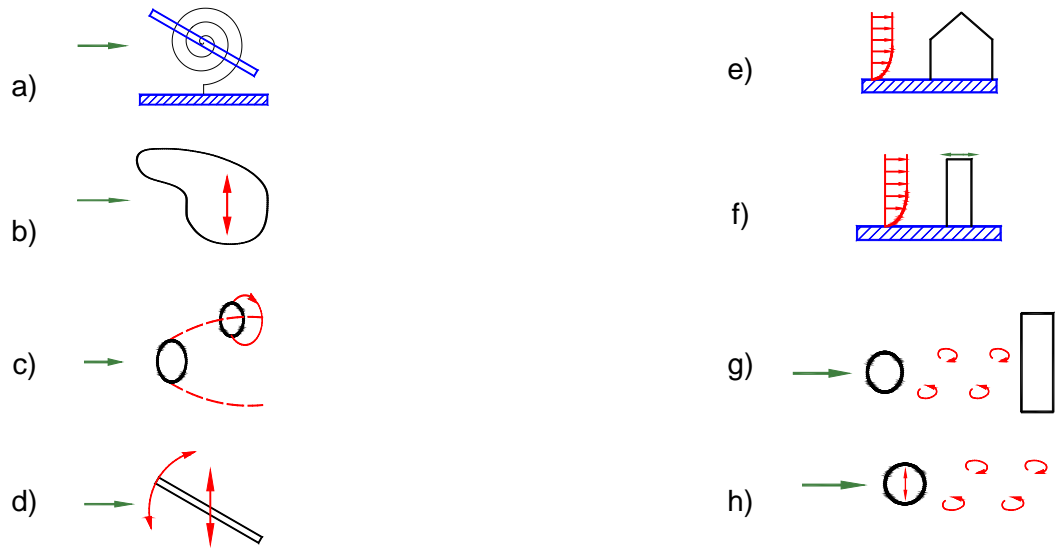


**Figura. 1.2. Bataneo (buffeting)**

Un resumen del tipo de efectos dinámicos del viento sobre las estructuras se presenta en la Tabla 1.1 y se muestra en la Figura 1.3.

**Tabla 1.1. Efectos dinámicos en estructuras, (Hernández, et al., 2005)**

<b>Fenómeno</b>	<b>Fuerzas internas</b>	<b>Condiciones aerodinámicas</b>	<b>Figura</b>	<b>Comentarios</b>
Divergencia torsional	Elásticas	U: uniforme F: cuasiestáticas	Fig. 1.3.a	Puentes, postes de señalización
Galope transversal	Elásticas, tensión	U: uniforme F: cuasiestáticas	Fig. 1.3.b	Estructuras esbeltas y cables
Galope inducido por estela	Tensión	U: estela estacionaria (valores medios) F: depende de la posición	Fig. 1.3.c	Catenarias de ferrocarril
Flameo	Elásticas	U: uniforme F: no estacionarias (a veces cuasiestáticas)	Fig. 1.3.d	Puentes colgantes
Bataneo, ráfagas. Carga cuasiestática	Elásticas	U: turbulencia atmosférica F: cuasiestáticas	Fig. 1.3.e	Edificios y puentes
Bataneo, ráfagas. Carga dinámica	Elásticas	U: turbulencia atmosférica (banda ancha) F: cuasiestáticas	Fig. 1.3.f	Edificios esbeltos y puentes
Bataneo de estela	Elásticas	U: estela de un edificio a barlovento, banda estrecha F: no estacionarias	Fig. 1.3.g	Rascacielos en la estela de otros
Desprendimiento de torbellinos	Elásticas	U: corriente uniforme F: debidas a la propia estela, no estacionarias	Fig. 1.3.h	Estructuras esbeltas (chimeneas), cables y tirantes



**Figura 1.3. Esquemas de las configuraciones típicas en las que se presentan inestabilidades (Meseguer et al. 2001)**



## **CAPÍTULO 2**

### **DISEÑO ÓPTIMO**

#### **2.1 EFECTOS EN LAS ESTRUCTURAS DEBIDAS A VIENTOS EXTREMOS**

Existe una gran cantidad de desastres naturales, que ocasionan pérdidas importantes en la actividad económica y humana. Este tipo de fenómenos provoca que la sociedad civil viva en constante peligro, sobre todo las personas que habitan en edificaciones endebles.

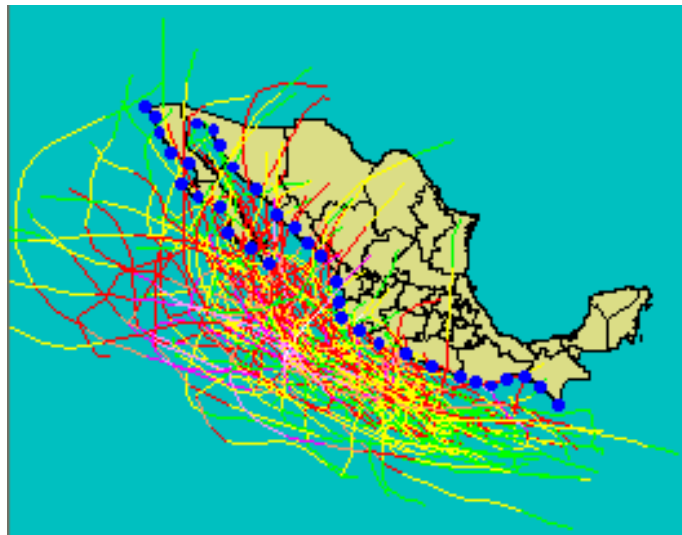
Año con año nuestro país se ve afectado por una cantidad de huracanes, desde los meses de mayo y junio hasta los meses de noviembre, tanto en el Océano Atlántico como en el Océano Pacífico.

Una muestra de la trayectoria que siguen los diferentes eventos hidrometeorológicos en México se muestra en las figuras 2.1 y 2.2, mientras que, en la figura 2.3 están marcadas las zonas que se ven afectadas por el impacto de estos eventos.

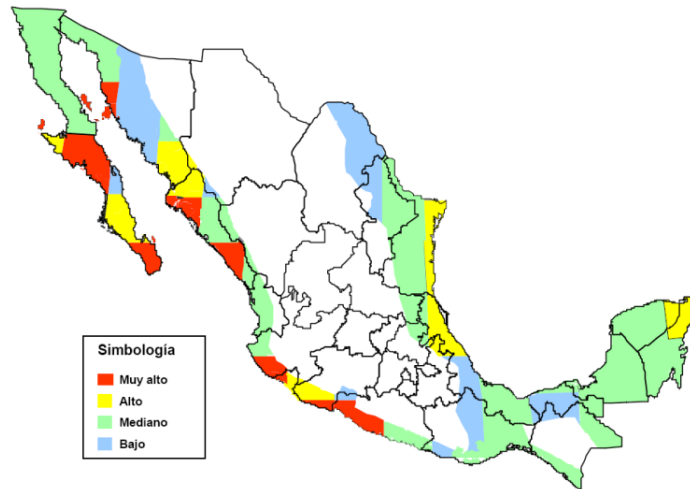
Por su parte, las tormentas intensas se producen con poca frecuencia y pueden ser consideradas estadísticamente como eventos poco comunes. Puesto que generalmente se acepta que cada tormenta es independiente de todas las otras, la distribución adecuada de probabilidad para un número reducido de tormentas, que ocurren por año, es la distribución de Poisson (William, 1971). La hipótesis es aceptada para la estimación del costo esperado (sección 3.4.12, capítulo 3)



**Figura. 2.1. Peligros hidrometeorológicos en el Océano Atlántico**



**Figura. 2.2. Peligros hidrometeorológicos en el Océano Pacifico**



**Figura. 2.3. Mapa de peligros por incidencia de ciclones CENAPRED (2001)**

Por lo anterior, existe la necesidad de construir estructuras que funcionen, aún después de haber sido expuestas a un evento eólico de gran importancia. Como ejemplo tenemos lo ocurrido durante el huracán Wilma en el año 2005, el cual golpeó la zona turística de Cancún, los daños en esta ciudad generaron alrededor de 2.1 millones de dólares en pérdidas. Otro evento importante fue el huracán Katrina en el año 2005, que dejó la ciudad de Nueva Orleans completamente inundada, lo que provocó que el costo económico y humano fuera muy alto.

Los eventos antes mencionados, dieron como resultado que las actividades de cada comunidad se vieran afectadas. A pesar de que están localizadas en diferentes países, con distintas economías, ambos sitios exhibieron lo vulnerables que son ante eventos de una inesperada frecuencia.

Lo anterior es sólo un ejemplo de la vital importancia del uso de nuevas tecnologías que mitiguen el daño en las estructuras. Si bien en este trabajo sólo se estudian edificios, en un futuro se puede extrapolar la solución a estructuras más sencillas, como la vivienda popular.

Esta trabajo tiene como objetivo proponer una metodología para obtener la combinación de la velocidad de viento y el costo de la estructura, que permitan decidir el grado de riesgo que está dispuesto a asumir el propietario de la edificación. Esta decisión se puede generar con base en el conocimiento de las combinaciones velocidad de viento-costo de la estructura, que se puedan presentar durante la vida útil de la estructura.

### **2.1.1 Identificación y determinación del daño**

El daño en las estructuras se pueden clasificar en generales (a, b, c, d y e) y locales (f y g), de acuerdo al tipo de falla que generan:

- a) Deformación excesiva
- b) Pérdida de estabilidad
- c) Fatiga
- d) Voladura de techos
- e) Vibraciones que afectan el confort de los ocupantes
- f) Rotura de elementos no estructurales
- g) Rotura de elementos estructurales



#### *2.1.1.1. Efectos generales*

Entre los diferentes tipos de efectos que generan las fuerzas de viento a una construcción en conjunto, están las que se presentan cuando las personas sienten una incomodidad debido a distorsiones, desplazamientos o aceleraciones excesivas. Estos efectos son provocados, en la mayoría de las veces, debido a que la construcción tiene una geometría o propiedades dinámicas susceptibles a los efectos del viento. Elementos de juicio para conocer el grado de susceptibilidad de una estructura ante los efectos de viento son la relación entre su dimensión menor y su altura, así como su frecuencia natural.

#### *2.1.1.2. Efectos locales*

Nos referimos a efectos locales como aquellos daños que se presentan en elementos no estructurales, los que pueden fallar aún cuando se utilicen de manera correcta los códigos de análisis y diseño. Esto, debido a que el comportamiento del viento es aleatorio.

Una de las fallas clásicas de estos elementos no estructurales ocurre en los tornillos o pernos que los sujetan, o en el mortero que detiene las tejas en los techos, en donde se llegan a presentar presiones superiores a las previstas, las que pueden afectar incluso a puertas y ventanas. En estos casos es necesario el ensayo de modelos en túnel de viento.

Otra causa muy frecuente, ocurre cuando durante un evento meteorológico, el viento levanta objetos y los convierte en proyectiles lanzados a velocidades muy altas, los cuales impactan en fachadas, cornisas o techos. Una vez que se destruyen puertas o ventanas, se genera el llamado efecto dominó dentro del inmueble, provocando serios daños al interior de la estructura. Como

ejemplo se tienen los daños que produjo el huracán Wilma (2005), el cual dejó sensiblemente dañada la zona hotelera de Cancún, lo que provocó un gran impacto económico en el sector turístico. En la mayoría de los casos las estructuras no colapsaron; sin embargo, los daños en elementos no estructurales fueron lo suficientemente graves para impedir el funcionamiento de las mismas. Esta reducción en las actividades dejó sin empleo a muchas personas, ya que fue necesario reparar las estructuras.

#### *2.1.1.3. Daño binario*

Determinar el daño estructural y no estructural no es una tarea sencilla, ya que, por una parte, existe incertidumbre en el comportamiento de los materiales, y por otra, la llegada de un evento hidrometeorológico que daña a la estructura es aleatorio, lo que trae como consecuencia, que la suposición en la forma en que las fuerzas inciden en la construcción no siempre es acertada.

Es por esta razón que a menudo se tiene que recurrir a indicadores cualitativos simplificados para estudiar el daño en estructuras sujetas al viento. Uno de estos indicadores es el llamado daño binario, en el que sólo se admiten dos estados de la estructura: daño y sin daño. El concepto de daño binario fue empleado por Rosenblueth (1976) para el estudio del diseño sísmico óptimo de estructuras.

Este indicador nos permitirá obtener el número de veces que se presenta el daño, cualquiera que este sea, para cada velocidad de viento que se desee evaluar.

## **2.2 COSTO ESPERADO**

En la industria de la construcción existe la imperante necesidad de construir edificaciones con la suficiente confiabilidad estructural al menor costo posible. El costo beneficio es sin duda el objetivo que día a día persiguen los empresarios de la construcción. Sin embargo, se ha observado que el costo de reparación de una estructura, aún y cuando se ha evitado el colapso, es muchas veces mayor que el costo total de la obra. Es por esta razón que se empezó a investigar la forma de darle a los propietarios la oportunidad de saber cuál es el grado de riesgo que están dispuestos a aceptar, de acuerdo con la importancia de su propiedad. Y considerando los costos de los contenidos, así como los de reparación y el costo de pérdidas humanas.

El diseño óptimo surge como una herramienta que por una parte, genera estructuras con una baja probabilidad de colapso, así como un reducido número de daños no estructurales; por la otra, permite conocer el costo mínimo que se requiere para su construcción. La metodología del diseño óptimo de estructuras ha sido aplicada exitosamente en el ámbito de la ingeniería sísmica, (Rosenblueth 1976).

En el caso de diseño óptimo por viento, se intenta relacionar la velocidad de viento de diseño que genere el mínimo costo de construcción, de tal forma que la probabilidad de daños se reduzca al mínimo.

## **2.3 COSTO DE LA ESTRUCTURA**

En Varela Alonso (2009) se define el costo como el gasto total aprobado después de la terminación de un proyecto.

Existen diferentes formas de calcular el costo de una estructura, algunos basados en la experiencia, observaciones y consultas; otros están basados en estudios detallados por actividad e insumos. En la Tabla 2.1, se clasifican de acuerdo con su nivel de confiabilidad.

**Tabla 2.1. Tipo de estimado (Varela, 2005)**

	<b>Tiempo de estimado</b>	<b>Precisión</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Información</b>
A	Orden de Magnitud  (o aproximados)	+/- 35%	1 a 60 minutos	Muy poca
B	Paramétricos (o por m <sup>2</sup> )	+/- 30%	1 a 4 hrs.	Conceptual (área)
C	Por Componentes (fases constructivas sistemas completos)	+/- 25%	1 a 2 días	Conceptual (área)
D	Por Ensamblés (elementos o piezas constructivas)	+/- 20%	1 a 7 días	Conceptual y anteproyecto
E	Precio Unitario	+/- 10%	3 a 4 semanas	Proyecto completo

Uno de los métodos que permite mejorar la estimación del costo de una estructura, es el Método de los Ensamblés, el cual permite agrupar componentes de fases constructivas completas manejando volúmenes o áreas unitarias. Por ejemplo, la cimentación la podemos descomponer en zapatas, contratrabes y dados; a estos elementos se les asigna un porcentaje del total de la cimentación. La facilidad de cuantificar con este procedimiento, hace del mismo una herramienta poderosa, rápida, verosímil, eficaz y pragmática para quien requiere hacer estimados aproximados (Varela, 2005). El procedimiento anterior resulta adecuado para los fines que se persiguen en esta tesis.

## **2.4 COMPARACIÓN DE REGLAMENTOS PARA DISEÑO POR VIENTO**

A continuación se mencionan las principales características de diferentes códigos de diseño.

En forma adicional se hacen comentarios y se hace una comparación entre ellos.

### **2.4.1. Consideraciones generales**

En este trabajo se utilizará el Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento, de la Comisión Federal de Electricidad.

### **2.4.2. Edificios rígidos y flexibles**

Para que una estructura no sea susceptible a las fuerzas de viento, tiene que cumplirse con lo que en la mayoría de los reglamentos se exige, esto es evitar una relación de la altura total entre la menor dimensión en planta, que sea menor que 5, y por otra parte que su frecuencia natural de vibración sea menor que la unidad.

Existen diferentes códigos para el diseño por viento, entre los que encontramos el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF 2004), el Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento, de la Comisión Federal de Electricidad (CFEDV, 2008); el reglamento de la American Society of Civil Engineers (ASCE, 2002), así como los Wind Load Provisions del National Building Code of Canada (NBCC, 1995).

### **2.4.3. Comparación de expresiones empleadas en el diseño estático de edificios sujetos al viento**

#### *2.4.3.1. Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento, de la Comisión Federal de Electricidad (CFEDV)*

Presión dinámica de base:

La presión que ejerce el flujo del viento sobre una superficie plana perpendicular a él, se calcula con la siguiente expresión:

$$q_z = 0.048GV_D^2 \quad (2.1)$$

donde:

$q_z$  presión dinámica de base

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

$V_D$  velocidad básica de diseño, en km/h

#### *2.4.3.2. Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF 2004) y las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento (NTCDV 2004)*

La presión que ejerce el flujo del viento sobre una construcción determinada, se obtiene tomando en cuenta su forma y está dada de manera general por la expresión:

$$P_z = 0.048C_p V_D^2 \quad (2.2)$$

donde:

$P_z$  presión de diseño que ejerce el flujo del viento sobre una construcción determinada

$C_p$  coeficiente local de presión, depende de la forma de la estructura.

$V_D$  velocidad de diseño a la altura  $z$

#### *2.4.3.3. American Society of Civil Engineers, ASCE (2002)*

Las presiones del viento de diseño para el sistema principal resistente a fuerza de viento de edificaciones de todas las alturas serán determinadas mediante la siguiente ecuación:

$$P_z = q_z G C_p \quad (2.3)$$

donde:

$P_z$  presión de viento para edificios altos

$q_z$  presión de la velocidad del viento evaluada a altura  $z = h$ , en  $N/m^2$  ( $lb/ft^2$ ).

$G$  factor de efecto de ráfaga

$C_p$  coeficiente de presión externa a ser usado en la determinación de las cargas de viento para edificaciones

#### *2.4.3.4. Wind Load Provisions, National Building Code of Canada (NBCC 1995).*

La presión o succión externa en la superficie de una estructura está dada por la siguiente ecuación:

$$P = qC_eC_gC_p \quad (2.4)$$

donde:

P presión o succión estática, actuando en dirección normal a la superficie

q presión de velocidad

C<sub>e</sub> coeficiente de exposición que refleja los cambios en la velocidad de viento con la altura y las variaciones alrededor del terreno

C<sub>g</sub> factor de ráfaga

C<sub>p</sub> coeficiente de presión externa, es un promedio de las variaciones alrededor del terreno

*2.4.3.5. Comentarios a las expresiones de diseño por viento, que corresponden para realizar un análisis estático.*

En los reglamentos como el RCDF (2004) y el de la CFEDV (2008), se muestran expresiones muy similares, sin embargo, el de la CFEDV (2008) es aplicable a toda la República Mexicana, ya que incluye las características topográficas del sitio cerca del mar o en lugares en donde existen obstáculos naturales.

En los reglamentos ASCE (2002) y NBCC (1995), se debe utilizar un factor de ráfaga, a diferencia del RCDF (2004) y del CFEDV (2008). La siguiente tabla muestra una comparación de los coeficientes de presión sugeridos en cada código.



**Tabla 2.2. Coeficientes de presión  $C_p$**

Reglamento	RCDF (2004)	CFE (2008)	ASCE (1998)	NBCC (1995)
Barlovento	0.8	0.8	0.8	0.8
Sotavento	-0.4 (1)	-0.2 -0.75 (2)	-0.2 a -0.5(3)	-0.5(4)
Paredes laterales	-0.8	-0.2 a -0.65(5)	-0.7	-0.7
Techos planos	-0.8	(6)	(7)	-1.0
Techos inclinados	-0.7			
del lado de sotavento		(6)	(7)	-1.0
Techos inclinados lado de barlovento	-0.8<0.04θ a -1.6<1.8	(6)	(7)	-1.0

<sup>1</sup> La succión se considerará constante en toda la altura de la pared de sotavento y se calculará para un nivel z igual a la altura media del edificio.

<sup>2</sup> Varía en función del ángulo de ataque y de la relación ancho largo de la base de la estructura.

<sup>3</sup> Varía en función de la relación largo y ancho de la base de la estructura.

<sup>4</sup> La altura se calcula  $-0.5H$ , donde H es la altura total de la estructura.

<sup>5</sup> Varía de acuerdo con diferentes inclinaciones de techo, ya sea en la zona de barlovento o sotavento.

<sup>6,7</sup> Depende en gran medida del ángulo de ataque, si se encuentra en barlovento o sotavento, de la relación altura-dimensión menor de la base y de si los techos son 1, 2 o 4 aguas.

El coeficiente de presión en la Tabla 2.2, en la cara de sotavento, varía para los 4 reglamentos.

Se observa que en las NTCDV (2004) es menor que en los otros códigos, debido a que el RCDF (2004) se aplica en zonas en donde las velocidades regionales del viento son particularmente bajas, con respecto a las que se presentan en las costas.

Para el coeficiente de presión en la zona del techo, ya sea en la cara de barlovento o sotavento, cabe destacar que el NBCC (1995) utiliza la unidad de una forma conservadora.

En cuanto a las normas mexicanas, se observa en términos generales una buena correspondencia entre las mismas, sin embargo existen condiciones especiales para

seleccionar los coeficientes de presión de sotavento y para las paredes laterales. La única excepción es la aplicación de las NTCDV (2004) en la condición de campo abierto, ya que se obtienen las velocidades más altas de viento asociadas a la falla, al igual que en el ASCE (2002).

#### 2.4.4. Análisis dinámico

##### 2.4.4.1. Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF, 2004) y Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento (NTCDV, 2004)

En estructuras del Tipo 2, los efectos estáticos y dinámicos debidos a la turbulencia se tomarán en cuenta multiplicando la presión de diseño calculada con ecuación 2.2, por un factor de amplificación dinámica determinado por:

$$G = 0.43 + g \sqrt{\frac{R}{C_e} \left( B + \frac{SF}{\beta} \right)} \geq 1 \quad (2.5)$$

donde:

$G$  factor de amplificación dinámica

$g$  factor de respuesta máxima

$R$  factor de rugosidad

$B$  factor de excitación de fondo

$S$  factor reductivo por tamaño

$F$  relación de energía en ráfaga

$C_e$  factor correctivo por exposición

$\beta$  fracción de amortiguamiento crítico, igual a 0.01 en estructuras de acero, y 0.02 en estructuras de concreto

#### 2.4.4.2. Manual de la Comisión Federal de Electricidad Diseño por viento (CFEDV, 2008)

Factor de amplificación dinámica para estructuras prismáticas

Este procedimiento sólo podrá emplearse si se cumplen las siguientes condiciones:

- a) 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.

El factor de amplificación dinámica para estas estructuras,  $F_{AD}$ , se calcula con la expresión:

$$F_{AD} = \frac{1+2k_p I_v(Z_s) \sqrt{B^2+R^2}}{1+7I_v(Z_s)} \quad (2.6)$$

donde:

$F_{AD}$  factor de amplificación dinámica

$I_v$  índice de turbulencia, evaluado a la altura de referencia,  $Z_s$

$Z_s$  altura de referencia en función de la forma que se contempla en el análisis dinámico

$B$  factor de respuesta de fondo

$R$  factor de respuesta en resonancia

$k_p$  factor pico

#### 2.4.4.3. American Society of Civil Engineers, ASCE (2002)

Para estructuras sensibles dinámicamente o flexibles, el factor de efecto de ráfaga será calculado por:

$$G_f = 0.925 \left( \frac{1 + 1.7I_z \sqrt{g_Q^2 Q^2 + g_R^2 R^2}}{1 + 1.7g_v I_z} \right) \quad (2.7)$$

donde:

$G_f$  factor de efecto de ráfaga para los sistemas principales resistentes a fuerza de viento de edificaciones flexibles y otras estructuras.

$I_z$  intensidad de turbulencia

$Q$  factor de respuesta de entorno de la Ecuación

$g_Q$  factor pico o máximo para respuesta de entorno

$g_R$  factor pico o máximo para respuesta resonante

$R$  factor de respuesta de resonancia

$g_v$  factor pico o máximo para respuesta de viento

#### 2.4.4.4. Wind Load Provisions, National Building Code of Canada (NBCC 1995)

El factor de ráfaga tiene la siguiente expresión:

$$C_g = 1 + g_P \left( \frac{\sigma}{\mu} \right) \quad (2.8)$$

donde:

$C_g$  coeficiente de ráfaga.

$g_P$  coeficiente que incluye los máximos efectos de carga.

$\sigma$  promedio de la raíz al cuadrado de los efectos de carga

$\mu$  factor de los efectos promedio de la carga

*2.4.4.5. Comentarios a las expresiones de diseño por viento, para realizar un análisis dinámico.*

Entre el RCDF (2004) y el NBCC (1995), existen grandes similitudes para obtener un factor que tome en cuenta los efectos dinámicos. Los parámetros  $g_p$  factor pico para los efectos de carga (NBCC, 1995) y  $g$  factor de respuesta máxima (RCDF, 2004) varían considerablemente, además que el empleo de la ecuación del NBCC (1995), asegura un valor mayor que 1, mientras que con el RCDF (2004) podría ser menor que la unidad.

En un estudio realizado para comparar los factores de amplificación dinámica, se observó que el valor más alto corresponde a las NTCDV (2004) debido a que el tiempo de promediación de su velocidad media es de 3 segundos; enseguida se tiene el valor del código canadiense NBCC (1995), y por último tenemos el valor del reglamento norteamericano ASCE (2002).



## **CAPÍTULO 3**

### **PROPUESTA PARA OBTENER LA VELOCIDAD ÓPTIMA**

#### **3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS EN ESTUDIO**

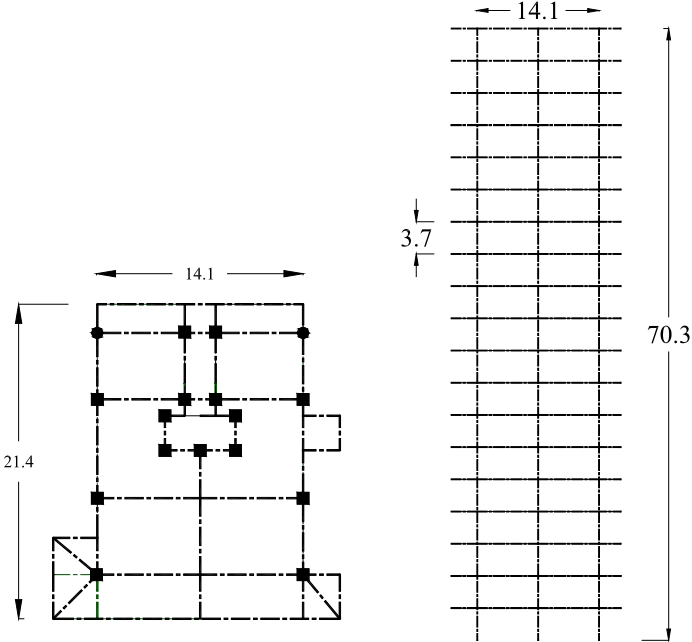
Se utilizarán cinco modelos de edificios localizados en las costas de la República Mexicana. Estos se encuentran en las ciudades de Cancún, Acapulco y Puerto Vallarta, y están ubicados en sitios donde son más susceptibles a los efectos del viento.

Cada uno de los proyectos tiene características propias, desde la planta tipo hasta la altura. De igual forma sus fachadas cuentan con balcones y pretilas, por lo que cada modelo de edificios tiene una configuración distinta. Todos están en construcción o al menos existe el proyecto ejecutivo.

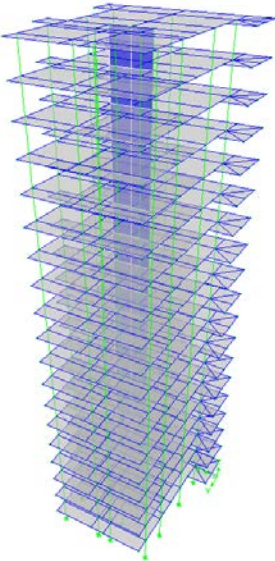
##### **3.1.1. Modelo 1 "Torre Cancún"**

Estructura ubicada en la península mexicana, en la ciudad de Cancún, en la zona residencial. Es un edificio de departamentos de 18 niveles, tiene una planta tipo con dimensiones de 14.1 m por 21.4 m, y su altura total es de 70.3 m. Su estructura está formada por marcos de concreto y el sistema de piso, por una losa de concreto reforzada colada en forma monolítica con sus apoyos. Las columnas son rectangulares orientadas en ambos sentidos de la estructura, y cuenta con muros de concreto reforzado en las dos direcciones.

Tiene una fachada con ventanales adheridos por un sistema de cancelería de aluminio a la estructura principal, y un área de balcones distribuidos en dos de sus lados (ver Figuras 3.1 y 3.2).



**Figura 3.1. Planta tipo y elevación del modelo "Torre Cancún"**



**Figura 3.2. Modelo "Torre Cancún"**

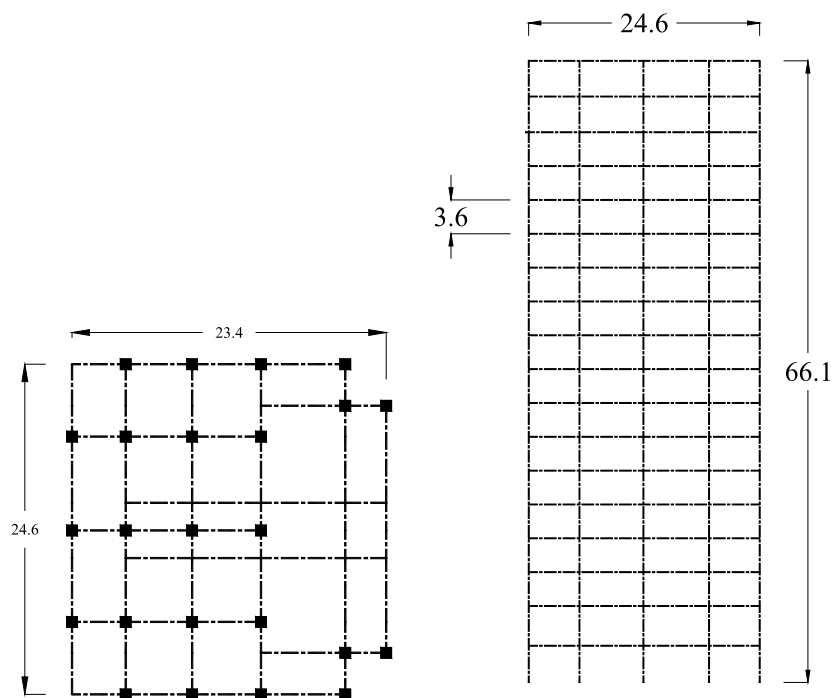


### 3.1.2. Modelo 2 "SIS ACAPULCO"

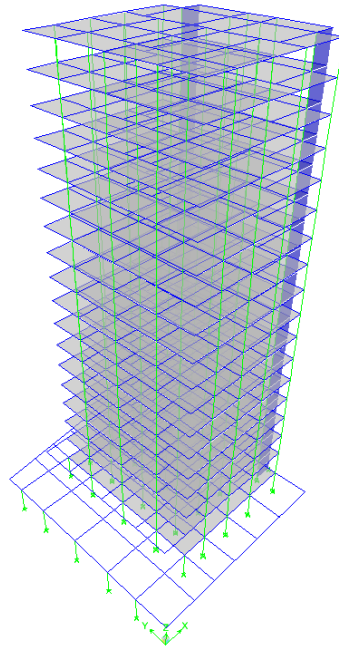
Está ubicado en la ciudad de Acapulco, en la zona residencial del puerto, tiene una altura total de 66.13m. En el primer piso se tiene una planta con un largo de 29.37m y un ancho de 36.43 m; las dimensiones de la planta típica son 23.41m por 24.59 m.

La estructura está formada por marcos de concreto reforzado, con losas coladas monolíticamente con los apoyos. Las columnas en general tienen forma rectangular y están orientadas en ambas direcciones. Los muros estructurales son de concreto reforzado, orientados de igual forma que las columnas (Figuras 3.3 y 3.4).

Este edificio cuenta con un balcón tipo en todos los niveles. Para formar la fachada se cuenta con muros de mampostería desligados de la estructura principal.



**Figura 3.3. Planta tipo y elevación del modelo "SIS Acapulco"**

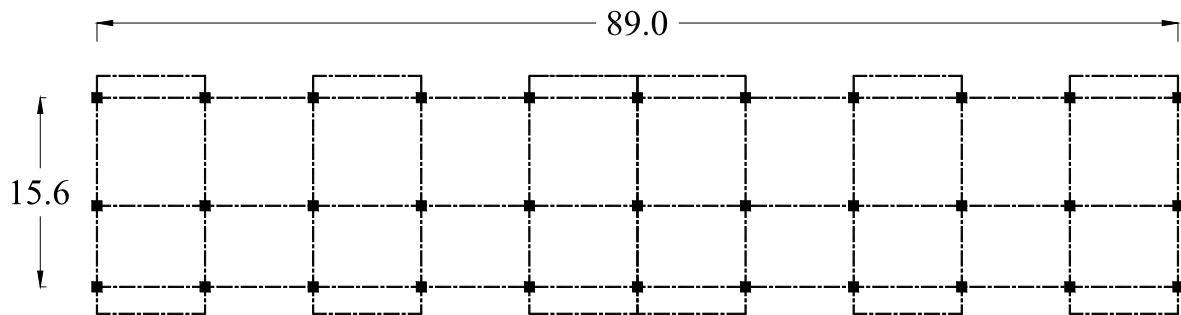


**Figura 3.4. Modelo "SIS ACAPULCO"**

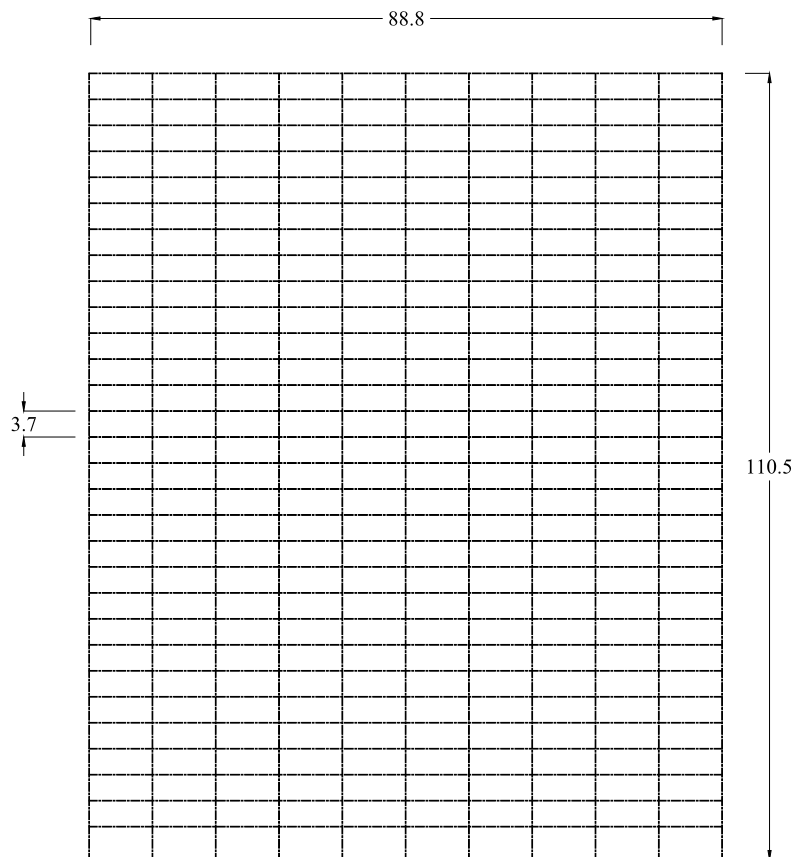
### **3.1.3. Modelo 3 "B'LAM Cancún"**

Está situado en la zona hotelera de Cancún, sus dimensiones en planta son de 15.56 m por 89 m de largo; alcanza una altura de 110 m (se tomó la decisión de incrementar el número de pisos debido a la necesidad de la investigación).

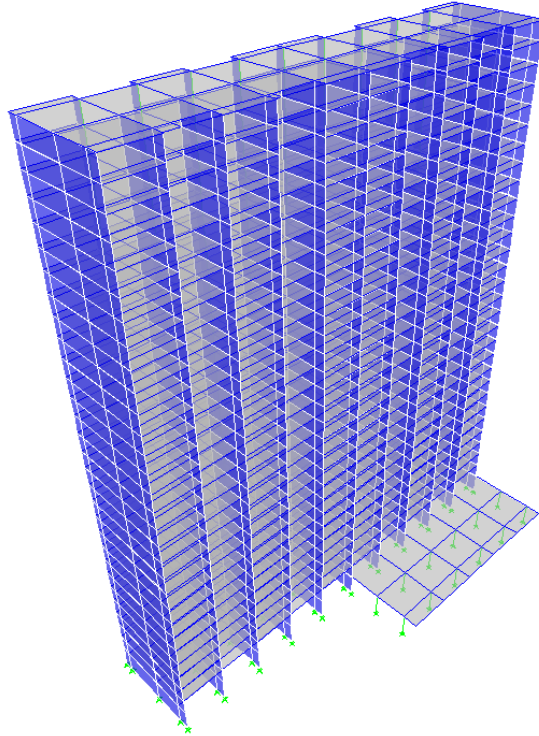
Esta estructura está formada por marcos de concreto en las dos direcciones, así como un sistema de piso a base de losas de concreto reforzado. Las columnas son de sección rectangular y están orientadas en la dirección transversal del edificio. Además se tienen dos muros de concreto reforzado, ubicados en el primero y último eje de columnas en dirección transversal, (Figuras 3.5, 3.6 y 3.7).



**Figura 3.5. Planta tipo del modelo "B'LAM Cancún"**



**Figura 3.6. Elevación del modelo "B'LAM Cancún"**

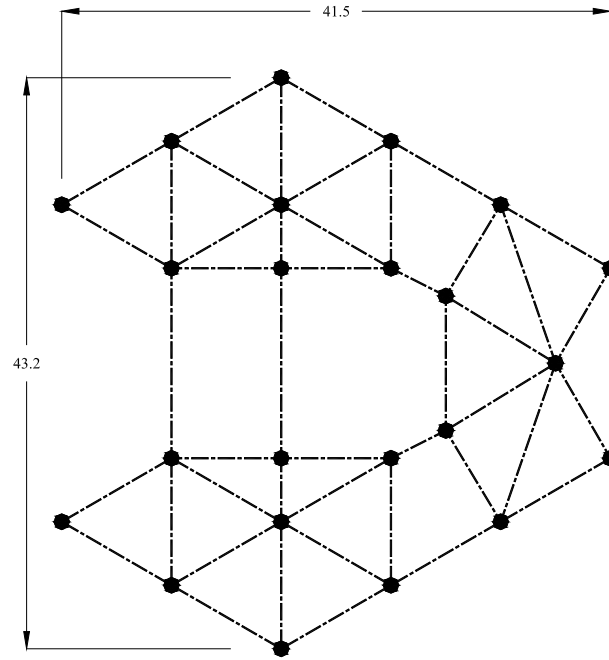


**Figura 3.7. Modelo "B'LAM Cancún"**

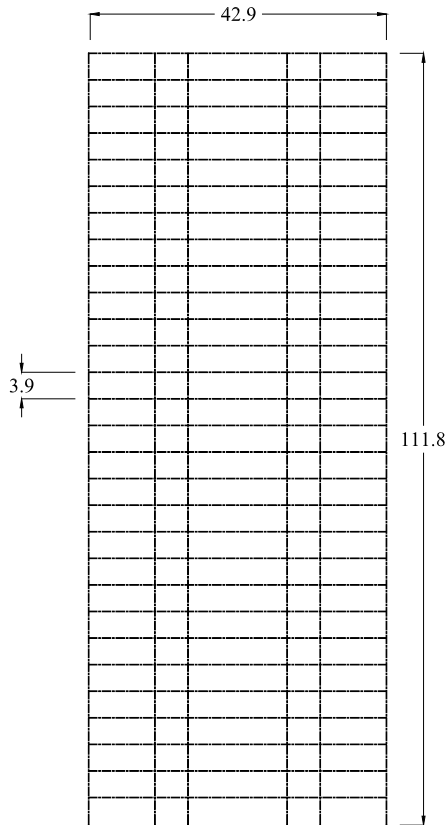
#### **3.1.4. Modelo 4 "Punta Ixtapa"**

La estructura pertenece a un desarrollo hotelero que se está proyectando en las cercanías de la ciudad de Ixtapa Zihuatanejo. El edificio tiene una planta irregular, la distancia entre sus ejes más distantes es de 43.16 m y en el sentido perpendicular a este es de 41.5 m. La altura de la estructura es de 111.8 m. Se tiene un hueco al centro de la estructura, desde el primer piso hasta el último (se tomó la decisión de incrementar el número de pisos debido interés de observar el comportamiento de la estructura con una mayor altura).

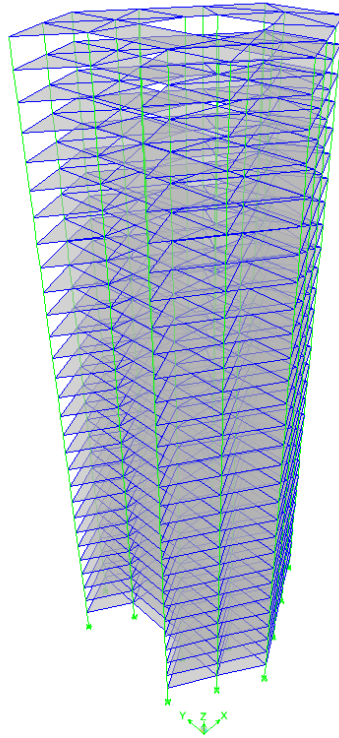
Este edificio está estructurado con marcos de concreto reforzado, así como por un sistema de piso de losas macizas coladas monolíticamente con sus apoyos. Todas las columnas son circulares, existen muros de concreto en la zona de elevadores, (Figuras 3.8, 3.9 y 3.10).



**Figura 3.8. Planta tipo del modelo "PUNTA IXTAPA"**



**Figura 3.9. Elevación del modelo "PUNTA IXTAPA"**



**Figura 3.10. Modelo "PUNTA IXTAPA"**

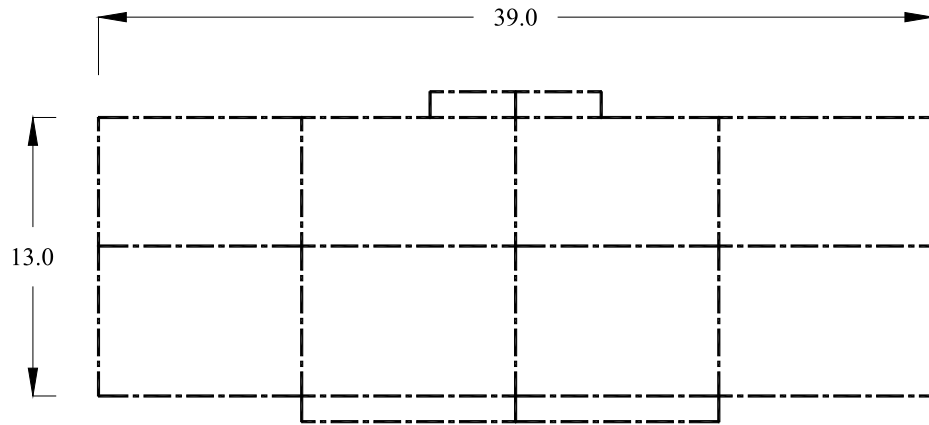
### **3.1.5. Modelo 5 "Torre Nautilus"**

Es una construcción de forma rectangular, ubicada en la ciudad de Acapulco. Cuenta con dos niveles de estacionamientos y el resto será destinado a departamentos residenciales.

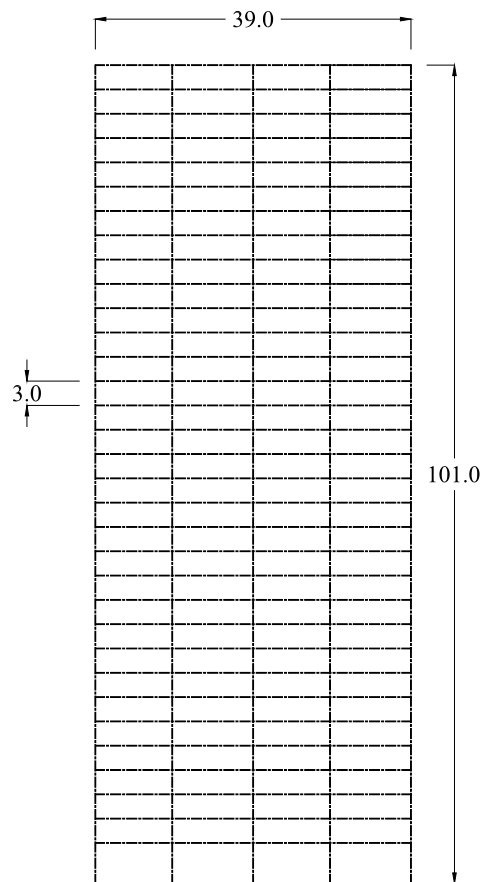
La planta del edificio es de 39 m en el sentido longitudinal, y 13 m en el sentido transversal.

La altura total de edificio es de 101 m.

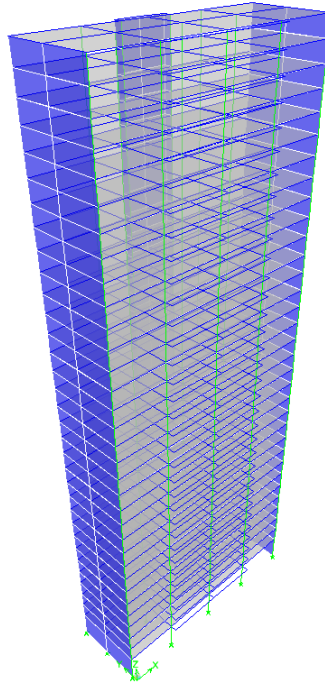
La estructura es a base de marcos de concreto, en las dos direcciones. Las columnas son de sección rectangular y están orientadas en dirección transversal a la estructura, (Figuras 3.11., 3.12. y 3.13.).



**Figura 3.11. Planta tipo del modelo "TORRE NAUTILUS"**



**Figura 3.12. Elevación del modelo "TORRE NAUTILUS"**



**Figura 3.13. Modelo "TORRE NAUTILUS"**

## **3.2. PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS**

A continuación se describe en forma general el procedimiento de análisis y diseño, desde la concepción de los modelos, hasta la descripción de la metodología para obtener la velocidad óptima de diseño para cada estructura.

### **3.2.1. Datos de los modelos**

De acuerdo con los datos antes comentados, existen dos edificios con alturas de alrededor de 70m y otro grupo de tres edificios con alturas superiores a los 100 m. A estos últimos tres modelos se les incrementó la altura debido a que en el desarrollo del presente estudio se desea comparar el comportamiento de estructuras con características similares. En todos los modelos existe una planta tipo desde el segundo nivel hasta el último de los pisos.



### 3.2.2. Diseño y análisis inicial de la estructura

Se analiza cada modelo para una velocidad de diseño  $V_D=0$  km/h, es decir, únicamente se utiliza una combinación de peso propio más carga viva. Con el resultado de este análisis se diseñan todos los elementos de la estructura. Una vez que todas las columnas y trabes están diseñadas, se obtiene el peso total de la estructura, denotado este por  $w_o$ .

#### 3.2.2.1. Cálculo del costo inicial de la estructura, $C_{VR=0}$

Se llevó a cabo una investigación del precio de venta de diferentes construcciones, se realizó un desglose por área construida y por nivel, de tal forma que se obtuvo el precio por metro cuadrado de construcción, el cual incluye elementos estructurales, así como elementos no estructurales. Para los 5 modelos se utilizó el mismo precio, considerando que se encontraban en zonas hoteleras o residenciales.

Al multiplicar el precio por metro cuadrado, dependiendo la zona en donde se va a realizar el proyecto, por el área de la planta tipo y por el número de niveles, se puede obtener el precio de la estructura.

Se utilizó el Método de los Ensamblados para asignar diferentes porcentajes a los componentes que integran el precio total de la construcción, de tal forma que se puede identificar la proporción que representa cada parte en el costo total de la estructura. Esto nos permite incrementar de manera controlada el costo de los componentes estructurales con respecto a los no estructurales, como se presenta en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.1. Relación de porcentajes (Varela, 2005)**

<b>Partida</b>	<b>construcción</b>
	<b>%</b>
Cimentación	2.7
Superestructura	12.3
Techo	1.9
Cubierta exterior	9
Cubierta interior	13.5
Elevadores	4.2
Sistema Mecánico	17
Sistema Eléctrico	9.7
Especialidades	5.9
Obras exteriores	8.2
Condiciones Generales	16.6
Total	100

*3.2.2.2. Diseño de los modelos con el Manual de la Comisión Federal de Electricidad para  
Diseño por Viento*

Los cinco modelos serán diseñados de acuerdo con lo que indica el Manual para Diseño por Viento (CFEDV 2008), tanto para el análisis estático como para el análisis dinámico.

Con el propósito de obtener el peso total de la estructura correspondiente a cada velocidad y así obtener el costo de cada estructura, fue necesario analizar, y diseñar los cinco modelos para diferentes velocidades

### **3.3. Análisis Estático**

#### **3.3.1. Características de los modelos**

Las estructuras están clasificadas en tres grupos A, B y C, en el primer grupo se incluyen las estructuras que involucren pérdidas económicas, humanas o culturales excepcionalmente altas, en el segundo grupo engloba aquellos que ocasionan pérdidas intermedias, que es el grupo al cual pertenecen los modelos que estamos estudiando, en el tercer grupo están las estructuras que no implican graves daños a construcciones del Grupo A y B.

##### *3.3.1.1. Edificios rígidos y flexibles*

Para que una estructura sea resistente a las fuerzas de viento, tiene que cumplirse con lo que se exigen la mayoría de los reglamentos: evitar una relación de la altura total entre la menor dimensión en planta de la estructura menor a 5 y por otra parte que su frecuencia natural de vibración sea menor que la unidad.

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

De acuerdo con la respuesta al viento una estructura se puede clasificar en 4 diferentes tipos: 1, 2, 3 y 4. Las estructuras del tipo 1 son aquellas que son poco sensibles a las ráfagas de viento. Las que se clasifican con el tipo 3 y 4 abarcan por una parte a estructuras con forma cilíndrica y con formas aerodinámicas inestables como son los cables. Todos los modelos que se estudian en este trabajo, se ajustan al Tipo 2, ya que son estructuras prismáticas con periodos fundamentales de vibración de más de un segundo.

### 3.3.1.3. Clasificación de la estructura de acuerdo con el grupo, tipo y características del terreno

Para seleccionar la topografía del terreno, se consideró que se tiene un terreno plano sin obstrucciones. Este tipo de terreno es comúnmente adoptado como referencia en los reglamentos de diseño.

### 3.3.1.4. Cálculo de las fuerzas de viento con base en el Manual CFEDV(2008)

Cálculo de la velocidad regional  $V_R$ , de acuerdo con los mapas de isotacas para la ciudad que corresponda.

### 3.3.1.5. Cálculo de la velocidad media ( $V_D$ )

Para obtener la velocidad media se requiere obtener el factor  $F_{rz}$ , que toma en cuenta el efecto de las características de exposición local. Dependiendo de la altura  $z$ , el factor de topografía se puede calcular de la siguiente manera:

$$F_{rz} = c \quad \text{Si } z \leq 10 \text{ m} \quad (3.1)$$

$$F_{rz} = c \left( \frac{z}{10} \right)^\alpha \quad \text{Si } 10 < z < 200 \text{ m} \quad (3.2)$$

$$F_{rz} = c \left( \frac{\delta}{10} \right)^\alpha \quad \text{Si } z \geq 200 \text{ m} \quad (3.3)$$

donde:

$z$  altura por encima del terreno natural, a la cual se desea conocer la velocidad de diseño, en m

$\alpha$  exponente que determina la forma de la variación de la velocidad, del viento con la altura,

adimensional

$\delta$  altura medida a partir del nivel del terreno de desplante, por encima de la cual la variación de la velocidad del viento no es importante y puede suponerse constante; a esta altura se le conoce como altura gradiente; en m

c coeficiente de escala de rugosidad, adimensional

Una vez que se tienen los factores antes mencionados, es posible calcular la velocidad media de diseño  $V_D$  como:

$$V_D = F_T F_{Tz} V_R \quad (3.4)$$

en donde:

$V_D$  velocidad media de diseño

$F_T$  factor de topografía local

$F_{Tz}$  factor de exposición local

$V_R$  velocidad regional

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

La presión dinámica de base, es la presión que ejerce el flujo de viento sobre una superficie plana perpendicular a la estructura, sin embargo, para obtener la magnitud de la presión es necesario obtener el factor por corrección por temperatura, tomando en cuenta la presión barométrica y la temperatura ambiental, esto es:

$$G = \frac{0.0392\Omega}{273+\tau} \quad (3.5)$$

en donde:

G factor de corrección por temperatura

$\Omega$  presión barométrica, en mm de Hg

$\tau$  temperatura ambiente, en °C

Finalmente, la presión dinámica de base se obtiene con la siguiente ecuación:

$$q_z = 0.0048GV_D^2 \quad (3.6)$$

en donde:

$q_z$  presión dinámica de base.

G factor de corrección por temperatura.

$V_D$  velocidad básica de diseño.

### 3.3.1.7. Cálculo de la presión actuante sobre la estructura

Para obtener las fuerzas de diseño es necesario definir lo que se denomina el empuje medio o estático, utilizando los coeficientes de presión, los que permiten determinar el efecto de la variación de la presión, según sea la geometría o forma de la construcción. Se utiliza la siguiente expresión:

$$p_z = C_p q_z \quad (3.7)$$

en donde:

$p_z$  presión actuante sobre la construcción determinada

$C_p$  coeficiente de presión

$q_z$  presión dinámica de base

### 3.3.1.8. Fuerza sobre construcciones cerradas.

Se consideran construcciones cerradas aquéllas formadas por techos y muros no necesariamente sin aberturas, por lo que las presiones actuantes sobre sus superficies exteriores e interiores se deben calcular con la siguiente ecuación:

$$F_{es} = P_z A_z \quad (3.8)$$

con

$$P_z = (P_e - P_i) = P_n \quad (3.9)$$

en donde:

$F_{es}$  fuerza estática resultante del viento que actúa perpendicularmente sobre las superficies o elementos estructurales de la construcción

$P_z$  presión de diseño a la altura  $z$

$P_e$  presión exterior

$P_i$  presión interior

$P_n$  presión neta

$A_z$  área de la estructura, o parte de ella, sobre la que actúa la presión de diseño

### 3.3.1.9. *Presiones exteriores*

El signo de las presiones exteriores, será positivo cuando ejerzan un empuje y negativo cuando ejerzan una succión. La presión se determina con la siguiente ecuación:

$$P_e = C_{pe} K_A K_L q_z \quad (3.10)$$

donde:

$P_e$  presión exterior

$C_{pe}$  coeficiente de presión exterior

$K_A$  factor de reducción de presión por tamaño de área

$K_L$  factor de presión local

$q_z$  presión dinámica de base del viento

### 3.3.1.10. *Presiones interiores*

Se debe tener cuidado especial en la selección del coeficiente de presión interior, debido a que está en función de la permeabilidad y de las aberturas dominantes sobre la superficie que conforma la estructura. La presión interior se calcula de la siguiente manera:

$$P_i = C_{pi} q_z \quad (3.11)$$

en donde:



$P_i$  presión interior

$C_{pi}$  coeficiente de presión interior

$q_z$  la presión dinámica de base del viento

### 3.4. Análisis dinámico

De acuerdo con lo que indica el inciso 4.4.1. del Manual de Diseño de Obras Civiles de Diseño por Viento CFEDV (2008), si la relación entre la altura y el ancho de la estructura es mayor que cinco o tiene un periodo fundamental de la estructura mayor que 1, se debe revisar la acción resultante de la interacción dinámica entre el flujo del viento y las estructuras que pertenezcan a los tipos 2 y 3. En la Tabla 4.4 se puede observar que una de las dos condiciones se cumplen por lo que es necesario tomar en cuenta los efectos dinámicos.

#### 3.4.1. Fuerza equivalente

En caso de que se quiera evaluar la respuesta dinámica, las fuerzas dinámicas que se generan se obtienen mediante una fuerza equivalente:

$$F_{eq} = F_{es} F_{AD} \quad (3.12)$$

en donde:

$F_{eq}$  fuerza equivalente

$F_{es}$  fuerza estática

$F_{AD}$  factor de amplificación dinámica

### 3.4.2. Cálculo del factor de amplificación dinámica, $F_{AD}$

Para utilizar el  $F_{AD}$ , es necesario revisar si la estructura es susceptible a los efectos dinámicos, como se indica en el inciso, 3.6.1.2 del Manual CFEDV (2008). El  $F_{AD}$  se calcula de la siguiente manera:

$$F_{AD} = \frac{1+2k_p I_v(Z_s) \sqrt{B^2+R^2}}{1+7I_v(Z_s)} \quad (3.13)$$

donde:

$F_{AD}$  factor de amplificación dinámica

$I_v$  índice de turbulencia, evaluado a la altura de referencia,  $Z_s$

$Z_s$  altura de referencia en función de la forma que se contempla en el análisis dinámico

$B$  factor de respuesta de fondo

$R$  factor de respuesta en resonancia (relación de amortiguamiento total será de 1.5% CFEDV 2008)

$k_p$  factor pico

### 3.4.3. Revisión de los desplazamientos

Una vez que se obtienen las fuerzas equivalentes, se procede a realizar el análisis estructural de los modelos. Para diseñar se utilizarán las NTCDCEC (Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (2004).

En el Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Viento, en la sección 4B.2.1 se recomienda utilizar las condiciones límites de servicio que se indican en la Tabla B.3 del Manual CFEDV(2008).

El desplazamiento máximo ( $\Delta_{\text{máx.}}$ ), en su extremo superior será menor que:

$$\Delta_{\text{máx.}} = \text{Altura}/500 \quad (3.14)$$

#### **3.4.4. Cálculo del peso de la estructura**

En este paso del proceso de diseño, es necesario obtener el peso con las nuevas dimensiones de los elementos de la estructura, columnas, traveses y muros de concreto reforzado. Dicho peso se asocia con la nueva velocidad de viento empleada en el diseño.

#### **3.4.5. Cálculo del peso ( $w_{i+1}$ ) de la estructura para una velocidad regional $V_R=170$ km/h**

Dado que el peso total de la estructura ya fue calculado para una velocidad de diseño  $V_D=0$  km/h, el cálculo del peso para una estructura diseñada para otra velocidad del viento (p.e., 170km/h) se puede determinar mediante una relación de pesos, como a continuación se muestra:

$$I = \frac{w_{i+1}}{w_1} > 1 \quad (3.15)$$

donde:

$I$  factor de incremento del costo

$w_{i+1}$  peso de la estructura con una velocidad de diseño  $V_D=170$  km/h

$w_1$  peso de la estructura con una velocidad de diseño  $V_D=0$  km/h

### **3.4.6. Cálculo del costo de la estructura para una velocidad de diseño de $V_R=170$ km/h**

El costo de la estructura se obtiene de multiplicar, el costo de la estructura para una velocidad de diseño  $V_D=0$  km/h por el factor de incremento del costo ( $I$ ).

$$C_{VD=170} = I * C_{VD=0} \quad (3.16)$$

donde:

$C_{VD=170}$  costo de la estructura para  $V_D=170$  km/h

$C_{VD=0}$  costo de la estructura para  $V_D=0$  km/h

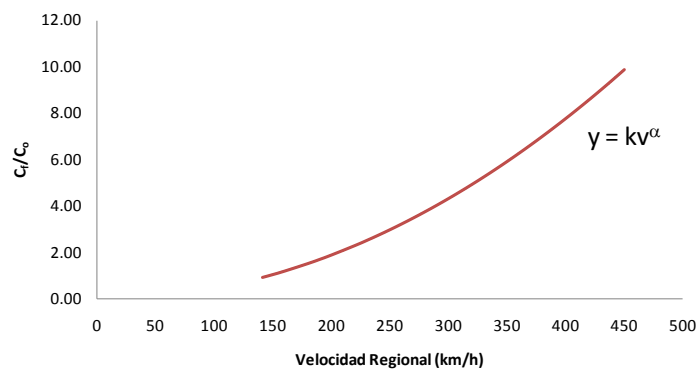
### **3.4.7. Velocidad de viento vs costo de la estructura**

Esta velocidad regional con la que se diseña, no provoca precisamente el colapso, aunque si se puede producir daño en los elementos estructurales y/o no estructurales. La evaluación de estos costos suele ser difícil de obtener a menos que se tengan datos obtenidos después de un evento, o se utilicen hipótesis con base en un método probabilista.

El costo de la estructura incluye únicamente los elementos estructurales. Para cada estructura se analiza y diseña una configuración nueva de elementos.

Al obtener el costo para diferentes velocidades de viento, se procede a trazar una curva exponencial (Figura 3.14) debido a que es igual a la que se propone en el manual de la CFEDV (2008) para diseño óptimo, de esta forma se pueden comparar. Esta gráfica relaciona la velocidad regional contra el costo normalizado (costo final  $C_f$  entre el costo inicial  $C_o$ ). Los parámetros  $k$  y  $\alpha$  están definidos por los valores de velocidad regional y costo de la estructura

Los resultados anteriores serán parte del costo esperado, con el que se obtiene la velocidad de diseño óptima de tal forma que esta propuesta mantiene el mismo concepto que presenta el manual antes mencionado, que son el costo inicial más el costo de las pérdidas. El primero está desglosado por el Método de los Ensamblados, de tal forma que solo se incrementa el valor de los elementos estructurales.



**Figura 3.14 Velocidad Regional vs. Costo normalizado**

### 3.4.8. Cálculo del costo de las pérdidas para la velocidad de diseño $V_R=170$ km/h

A continuación se explica la metodología que se usó para obtener el costo de las pérdidas, con base en dos procedimientos fundamentales: el Método de Montecarlo y la Distribución de Gumbel.

### **3.4.9. Procedimiento para obtener la velocidad regional del viento**

El Método de Montecarlo se utiliza, junto con la distribución de Gumbel, para simular la velocidad del viento asociada con una probabilidad de excedencia. La metodología empleada se resume a continuación:

1. Con ayuda de la distribución de Gumbel, se relaciona la velocidad regional con la distribución de probabilidad con la siguiente expresión:

$$V_R = u - \frac{\ln(-\ln F(x))}{\alpha} \quad (3.17)$$

donde:

$V_R$  velocidad regional del viento

$F(x)$  probabilidad de excedencia

$\alpha$  y  $u$  parámetros de la distribución

2. Obtener los parámetros de la distribución con ayuda de la ecuación (3.17) de la siguiente forma:

Considerando que se evalúan los períodos de retorno para 50 y 200 años, es posible formar un sistema de ecuaciones de dos ecuaciones con dos incógnitas en función de la velocidad del viento y los parámetros  $\alpha$  y  $u$ , como se muestra a continuación:

$$V_{R(Tr=50años)} = u - \frac{\ln(-\ln F(\frac{1}{50}))}{\alpha} \quad (3.18a)$$

$$V_{R(Tr=200años)} = u - \frac{\ln(-\ln F(\frac{1}{200}))}{\alpha} \quad (3.18b)$$

donde:

$V_{R(Tr=50años)}$  velocidad para un periodo de retorno de 50 años (CFEDV)

$V_{R(Tr=200años)}$  velocidad para un periodo de retorno de 200 años (CFEDV)

La solución del sistema de ecuaciones resulta en:

$$\alpha = - \frac{\ln(-\ln F(\frac{1}{50}))}{V_{R(Tr=50años)} - u} \quad (3.19a)$$

$$u = V_{R(Tr=200años)} + \frac{\ln(-\ln F(\frac{1}{200}))}{\alpha} \quad (3.19b)$$

Al sustituir los valores de velocidad para un periodo de retorno de 50 y 200 años (para la ciudad de Cancún), el valor de  $u$  es de 50.032 y el valor de  $\alpha$  es de 0.0279.

3. Con los parámetros  $u$  y  $\alpha$  definidos, y con ayuda de la ecuación (3.17) es posible determinar velocidades regionales del viento asociadas con periodos de retorno variables. Para simular

velocidades regionales del viento se muestrearon 10,000 números aleatorios entre 0 y 1, los cuales son sustituidos por  $F(x)$  de la ecuación (3.17). Lo anterior es posible en virtud de las técnicas de Montecarlo.

### 3.4.10. Evaluación del daño

A continuación se utiliza el concepto de daño binario (Rosenblueth, 1976), de tal forma que se obtenga la evaluación del daño para cada velocidad regional del viento con la que se diseñó la estructura. Para determinar si la estructura fue dañada, se emplea la siguiente expresión:

$$\text{Si } V_{R(\text{simulada})} \geq V_{R(\text{diseño})} \Rightarrow \text{Existe daño} \quad (3.20a)$$

$$\text{Si } V_{R(\text{simulada})} < V_{R(\text{diseño})} \Rightarrow \text{No existe daño} \quad (3.20b)$$

donde:

$V_{R(\text{simulada})}$  velocidad regional simulada

$V_{R(\text{diseño})}$  velocidad regional de diseño

### 3.4.11. Probabilidad de falla ( $P_{fA}$ )

La probabilidad de falla con el número de veces que se presenta el daño para cada velocidad de diseño se obtiene

$$P_{fA} = N_i/N_T \quad (3.21)$$



donde:

$N_i$  número veces que se presenta el daño

$N_T$  número del tamaño de la muestra

### 3.4.12. Costo del ciclo de vida

El costo del ciclo de vida es la suma del costo inicial más el costo de los daños y se puede expresar de la siguiente manera (Pozos et al, 2010).

$$E(C_T(V_D^2, t)) = C_o + C_o(1 + Q)P_{fA}(1 - e^{-\gamma t})/\gamma \quad (3.22)$$

donde:

$E(C_T(V_D^2, t))$  costo esperado del ciclo de vida de la estructura

$\gamma$  tasa de descuento, tomada igual a 5%

$C_o$  costo inicial de la estructura (Sección 3.2.9)

$P_{fA}$  probabilidad de falla

$Q$  factor de proporcionalidad de las pérdidas económicas, para el estado límite de servicio, se tomará igual a 15

$t$  tiempo de servicio de la estructura, se consideran 50 años

### 3.4.13. Velocidad óptima de diseño

Una vez que se tiene el costo total esperado para cada velocidad de diseño, es posible graficar

$E(C_T(V_D^2, t))$  contra la velocidad de diseño para identificar la velocidad óptima de diseño (i.e.,

la que minimice a  $E(C_T(V_D^2, t))$ . Para determinar la velocidad óptima de diseño, los datos obtenidos de  $(E(C_T(V_D^2, t)), V_D)$  son ajustados a una ecuación cuadrática de la forma:

$$y = ax^2 + bx + cx \quad (3.23)$$

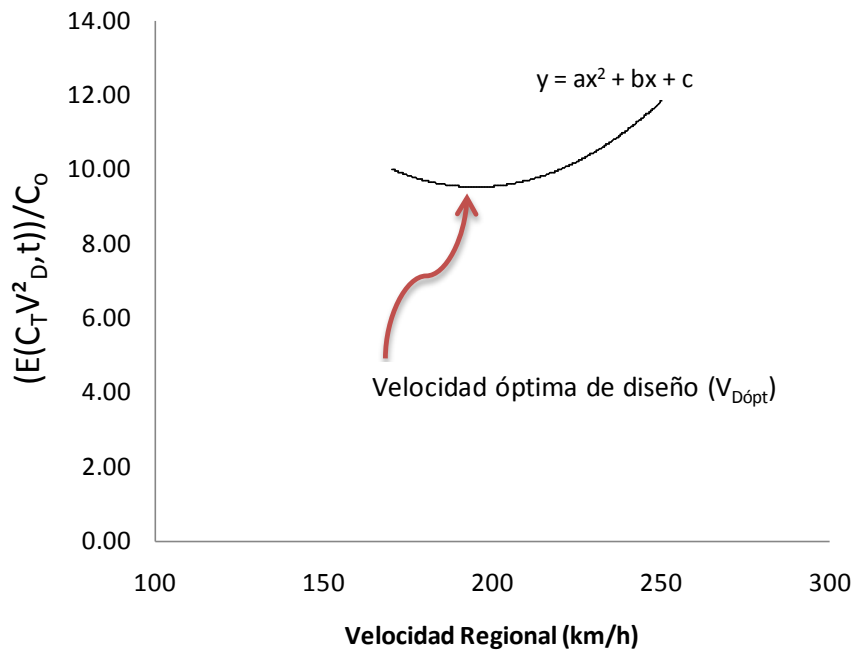
donde:

$$y = E(C_T(V_D^2, t))$$

$$x = V_D$$

$a$ ,  $b$  y  $c$  son parámetros del modelo

La ecuación (3.23) se minimiza para obtener la velocidad óptima de diseño,  $V_{D\text{ópt}}$ . La siguiente figura muestra un esquema del procedimiento descrito.



**Figura 3.15. Velocidad óptima de diseño ( $V_{D\text{ópt}}$ )**



## CAPÍTULO 4

### PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

#### 4.1 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

A continuación se muestran los cálculos de la propuesta para efectuar el diseño óptimo.

#### 4.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS

En la Tabla 4.1 sólo se muestran las dimensiones de la planta tipo para cada modelo.

**Tabla 4.1. Dimensiones de la planta tipo**

<b>Nombre del modelo</b>	<b>Ancho (m)</b>	<b>Largo (m)</b>	<b>Altura (m)</b>
Torre Cancún	14.10	21.40	70.30
SIS Acapulco	23.41	24.59	66.13
B'LAM Cancún	15.56	89.00	110.00*
Punta Ixtapa	41.15	43.16	111.75*
Torre Nautilus Acapulco	13.00	39.00	101.00*

\* Altura modificada

#### 4.3 DISEÑO Y ANÁLISIS INICIAL DE LA ESTRUCTURA

Para el diseño de la estructura, sin tomar en cuenta las fuerzas de viento, se utilizó un peso de una tonelada por metro cuadrado, en la que se incluye el peso propio de la estructura, muros divisorios, muros estructurales y no estructurales, más carga viva máxima. Se empleó un factor de carga de 1.4. Posterior al diseño y análisis, se obtuvo el peso total de la estructura con el programa SAP2000.

En la Tabla 4.2 se muestran los resultados para cada modelo, en donde se indica el peso inicial de la estructura.

**Tabla 4.2. Peso de la estructura cuando  $V_R=0$  km/h**

<b>Nombre del modelo</b>	<b><math>w_0</math> (t)</b>
Torre Cancún	3,996.74
SIS Acapulco	5,925.46
B'LAM Cancún	60,794.31
Punta Ixtapa	20,024.91
Torre Nautilus Acapulco	10,600.95

#### **4.3.1. Cálculo del costo inicial de la estructura ( $C_{VR=0}$ )**

Una vez que se tiene el costo de la estructura por metro cuadrado se procede a obtener el costo total de la estructura utilizando el desglose de las partidas de las cuales se compone la estructura, como se muestra en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3. Costo inicial de la estructura cuando  $V_R=0$  km/h**

<b>Partida</b>	<b>Construcción</b>	<b>Para los 5 modelos</b>
	<b>%</b>	<b>\$</b>
Cimentación	2.7	3,565,350.00
Superestructura	12.3	16,242,150.00
Techo	1.9	2,508,950.00
Cubierta exterior	9	11,884,500.00
Cubierta interior	13.5	17,826,750.00
Elevadores	4.2	5,546,100.00
Sistema Mecánico	17	22,448,500.00
Sistema Eléctrico	9.7	12,808,850.00
Especialidades	5.9	7,790,950.00
Obras exteriores	8.2	10,828,100.00
Condiciones generales	16.6	20,599,800.00
Total	100	132,050,000.00

#### **4.4 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA**

A continuación se presenta el diseño de los edificios en forma detallada, tomando en cuenta las diferentes características con que están contruidos.

##### **4.4.1. Análisis Estático**

En la Tabla 4.4 se clasifican las estructuras de acuerdo al periodo fundamental que tienen y se muestra para qué acciones del viento deben diseñarse.

**Tabla 4.4. Clasificación de las estructuras según su respuesta ante la acción del viento**

Nombre del modelo	Relación de esbeltez $\lambda$ (altura/ancho)	Periodo fundamental T (s)	Frecuencia	Respuesta ante la acción del viento	<sup>1</sup> Acciones de viento que deben considerarse
Torre Cancún	4.98	2.20	0.45	<sup>2</sup> Tipo 2	Vibraciones generadas
SIS Acapulco	2.82	2.45	0.41	<sup>2</sup> Tipo 2	por ráfagas
B'LAM Cancún	7.33	2.9	0.35	<sup>2</sup> Tipo 2	turbulentas
Punta Ixtapa	2.67	3.86	0.26	<sup>2</sup> Tipo 2	en la dirección del
Torre Nautilus Acapulco	7.60	4.10	0.24	<sup>2</sup> Tipo 2	viento (análisis dinámico)

<sup>1</sup> Acciones de viento que deben considerarse para su diseño.

<sup>2</sup> 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 fundamentales que favorecen la ocurrencia de oscilaciones importantes ante la acción del viento.

#### **4.4.2. Clasificación de las estructuras de acuerdo al grupo, tipo y características del terreno**

En la siguiente tabla se muestra la clasificación de las estructuras, con respecto a su respuesta ante la acción del viento, así como el tipo de topografía y se asignan parámetros necesarios para el posterior diseño de la estructura.

**Tabla 4.5. Clasificación de la estructura de acuerdo al grupo, tipo y características del terreno**

Nombre del modelo	Clasificación de la estructura por su importancia	Según su respuesta ante el viento	Topografía local (terreno prácticamente plano)	Categoría del terreno			
				Grupo	Tipo	$F_T$	$\alpha$
Torre Cancún	B	2	1		0.099	70.60	1.137
SIS Acapulco	B	2	1		0.099	66.16	1.137
B'LAM Cancún	B	2	1		0.099	110.00	1.137
Punta Ixtapa	B	2	1		0.099	110.00	1.137
Torre Nautilus Acapulco	B	2	1		0.099	101.00	1.137

#### 4.4.3. Cálculo de las fuerzas de viento

De acuerdo al lugar donde se encuentra la estructura se selecciona la velocidad regional de viento. Se considerará una velocidad de 170 km/h para todos los modelos. De esta manera se tendrá un estándar que permitirá conocer el peso y el costo de la estructura para diferentes velocidades de viento.

**Tabla 4.6. Velocidad regional del viento ( $V_R$ )**

Nombre del modelo	Velocidad regional del viento ( $V_R$ ) (km/h)
Torre Cancún	170
SIS Acapulco	170
B'LAM Cancún	170
Punta Ixtapa	170
Torre Nautilus Acapulco	170



#### 4.4.4. Cálculo de la velocidad media ( $V_D$ ).

A continuación se obtiene el factor de exposición local con las ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3, en combinación con la ecuación 3.4. Este procedimiento se repite para todas las velocidades. En la Tabla 4.7 solo se muestran los resultados para la velocidad regional  $V_R=170$  km/h.

**Tabla 4.7. Velocidad de diseño del viento ( $V_D$ ) para  $V_R=170$  km/h**

Nombre del modelo	Factor de exposición local $F_{rz}$	Velocidad de diseño del viento ( $V_D$ ) (km/h)
Torre Cancún	1.38	234.45
SIS Acapulco	1.37	233.11
B'LAM Cancún	1.44	245.19
Punta Ixtapa	1.44	245.47
Torre Nautilus Acapulco	1.43	243.02

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

En la Tabla 4.8 se muestran los resultados, así como los parámetros que se requieren para el cálculo de la presión dinámica de base.

**Tabla 4.8. Presión dinámica de base  $q_z$  con  $V_R=170$  km/h**

Nombre del modelo	Presión barométrica  mm de Hg	Temperatura <i>ambiental</i>  °C	Factor de corrección por temperatura  G	Presión dinámica en la base (para $h_{máx.}$ )  $q_z$
Torre Cancún	760	27.1	1.017	214.62
SIS Acapulco	760	27.90	1.020	212.17
B'LAM Cancún	760	27.10	1.017	293.73
Punta Ixtapa	760	27.90	1.020	294.09
Torre Nautilus Acapulco	760	27.90	1.020	288.24

#### 4.4.6. Cálculo de la presión actuante sobre la estructura

Se muestra en la Tabla 4.9 la presión que actúa en la pared de barlovento, por lo que se utiliza un coeficiente de presión de 0.8 y la ecuación 3.7.

**Tabla 4.9. Cálculo de las presión actuante sobre la estructura, para  $V_R=170$  km/h**

Nombre del modelo	Coficiente de presión  $C_p$	Presión dinámica de base (para $h_{máx.}$ )  $q_z$ kg/m <sup>2</sup>	Presión actuante  $p_z$ kg/m <sup>2</sup>
Torre Cancún	0.8	214.62	171.70
SIS Acapulco	0.8	212.17	169.73
B'LAM Cancún	0.8	293.73	234.73
Punta Ixtapa	0.8	294.09	235.27
Torre Nautilus Acapulco	0.8	288.24	230.59

#### 4.4.7. Fuerza sobre construcciones cerradas.

Para los valores de  $K_A$  y  $K_L$  se calcula la presión exterior y se toma como la unidad, ya que son los valores más desfavorables; se utiliza la ecuación 3.10.

**Tabla 4.10. Cálculo de las presiones exteriores en el último nivel (barlovento), para  $V_R=170$  km/h**

Nombre del modelo	Coeficiente de presión exterior $C_{pe}$	Factor de reducción de presión por tamaño de área $K_A$	Factor de presión local $K_L$	Presión dinámica de base (para $h_{máx.}$ ) $q_z$ kg/m <sup>2</sup>	Presión exterior $P_e$ kg/m <sup>2</sup>
Torre Cancún	0.8	1	1	214.62	171.70
SIS Acapulco	0.8	1	1	212.17	169.73
B'LAM Cancún	0.8	1	1	293.73	234.73
Punta Ixtapa	0.8	1	1	294.09	235.27
Torre Nautilus Acapulco	0.8	1	1	288.24	230.59

#### 4.4.8. Presiones interiores

Las presiones interiores para cada modelo se resumen en la siguiente tabla.

**Tabla 4.11. Cálculo de las presiones interiores en el último nivel (barlovento),  
para  $V_R=170$  km/h**

Nombre del modelo	Coeficiente de presión interior	Presión dinámica en la base	Presión interior
	$C_{pi}$	$q_z$ kg/m <sup>2</sup>	$P_i$ kg/m <sup>2</sup>
Torre Cancún	-0.3	214.62	-64.38
SIS Acapulco	-0.3	212.17	-63.65
B'LAM Cancún	-0.3	293.73	-88.11
Punta Ixtapa	-0.3	294.09	-88.22
Torre Nautilus Acapulco	-0.3	288.24	-86.47

#### 4.4.9. Fuerzas estáticas en la cara de barlovento

En la Tabla 4.12. se muestra la fuerza estática en la cara de barlovento, obtenida como el producto de la presión dinámica de base por el área en la cara de barlovento, como se indica en la ecuación 3.8.

**Tabla 4.12. Cálculo de las fuerzas estáticas en el último nivel (barlovento),  
para  $V_R=170$  km/h**

Nombre del modelo	Área	Presión dinámica de base	Fuerza estática
	A m <sup>2</sup>	$P_e-P_i$ kg/m <sup>2</sup>	$F_{es}$ t
Torre Cancún	60.79	235.38	14.30
SIS Acapulco	136.80	232.65	31.75
B'LAM Cancún	89.00	322.84	28.73
Punta Ixtapa	166.17	323.49	53.75
Torre Nautilus Acapulco	117.00	317.06	37.09

#### 4.4.10. Cálculo del factor de amplificación dinámica $F_{AD}$

Debido a que los cinco modelos tienen una relación (altura / base), mayor a cinco y porque sus frecuencias son menores a uno, se tienen que revisar los efectos dinámicos utilizando las ecuaciones 3.12 y 3.13.

Con las fuerzas equivalentes de la Tabla 4.13, se realiza el análisis y diseño de la estructura.

**Tabla 4.13. Factor de amplificación dinámica ( $F_{AD}$ ) y la fuerza equivalente, para  $V_R=170$  km/h**

Nombre del modelo	Factor de amplificación dinámica $F_{AD}$	Fuerza equivalente $F_{eq}$ t
Torre Cancún	1.215	17.37
SIS Acapulco	1.068	33.48
B'LAM Cancún	1.000	28.73
Punta Ixtapa	1.036	55.68
Torre Nautilus Acapulco	1.053	39.05

Se observa en la tabla anterior que el modelo “Tower Cancún” presenta el mayor valor del  $F_{AD}$ .

#### 4.4.11. Revisión de los desplazamientos

Una vez que se termina el diseño de los elementos (trabes y columnas) con el programa SAP2000, se revisan los desplazamientos relativos de la estructura y se comparan con los permitidos de acuerdo al Manual de la CFEDV (2008).

**Tabla 4.14. Revisión de los desplazamientos laterales en el último piso,  
para  $V_R=170$  km/h**

Nombre del modelo	Desplazamiento lateral relativo (en el último piso) $\Delta_{lateral}$ (cm)	Altura de la columna (cm)	Desplazamiento máximo $\Delta_{máximo}$ (cm)	Revisión de los desplazamientos $\Delta_{lateral} < \Delta_{máximo}$ (cm)
Torre Cancún	0.72	370	0.74	O.K.
SIS Acapulco	0.71	380	0.76	O.K.
B'LAM Cancún	0.69	365	0.73	O.K.
Punta Ixtapa	0.68	385	0.77	O.K.
Torre Nautilus Acapulco	0.57	300	0.60	O.K.

#### **4.5 PROCEDIMIENTO PARA OBTENER LA VELOCIDAD ÓPTIMA**

##### **4.5.1. Cálculo del peso de la estructura para $V_R=170$ km/h y el factor I**

En la Tabla 4.15 se muestran los resultados del cálculo del peso de la estructura una vez que se hizo el análisis y diseño para cada modelo, con las velocidades de diseño  $V_D=0$  km/h y  $V_D=170$  km/h.

Posterior al cálculo de los pesos, se obtiene el factor I que es el cociente del peso de la estructura del paso anterior y el actual, considerando que es un proceso iterativo. Se utiliza la ecuación 3.15.

**Tabla 4.15. Cálculo del factor I**

Nombre del modelo	$W_{VR=0}$ km/h	$W_{VR=170}$	$I = W_{VR=0} / W_{VR=170}$
	t	t	
Torre Cancún	3,996.74	4,716.18	1.184
SIS Acapulco	5,925.46	6,992.04	1.179
B'LAM Cancún	60,794.31	71,643.51	1.178
Punta Ixtapa	20,024.91	27,781.03	1.387
Torre Nautilus Acapulco	10,600.95	15,032.14	1.418

#### 4.5.2. Cálculo del costo ( $C_{VR=170}$ ) de la estructura para una velocidad de diseño $V_R=170$ km/h

En la siguiente tabla se muestra el costo de la estructura para  $V_R=170$  km/h el cual se obtiene al multiplicar el factor I (ecuación 3.15) por el costo de la estructura para  $V_R=0$  km/h.

**Tabla 4.16. Cálculo del costo ( $C_{VR=170}$ )**

Nombre del modelo	Costo $VR=0$ km/h	I	Costo $VR=170$ km/h =
	(\$)		Costo $VR=0$ km/h * I
			(\$)
Torre Cancún	132,050,000.00	1.184	156,370,364.06
SIS Acapulco	132,050,000.00	1.179	155,810,426.06
B'LAM Cancún	132,050,000.00	1.178	155,615,310.10
Punta Ixtapa	132,050,000.00	1.387	183,196,066.67
Torre Nautilus Acapulco	132,050,000.00	1.418	187,378,717.21

En la siguiente tabla se muestra el costo para diferentes velocidades regionales

**Tabla 4.17. Cálculo del costo para diferentes velocidades de viento**

Nombre del modelo	Costo inicial de las estructuras para diferentes velocidades (millones de pesos)		
	$V_R=170$ km/h	$V_R=200$ km/h	$V_R=250$ km/h
Torre Cancún	156,370,364.16	181,748,454.25	336,135,185.07
SIS Acapulco	155,810,426.06	165,116,647.34	210,820,827.49
B'LAM Cancún	155,615,310.10	191,499,225.82	277,022,453.63
Punta Ixtapa	183,196,066.67	269,677,092.96	505,534,887.32
Torre Nautilus Acapulco	187,378,717.21	305,979,369.98	622,803,658.83

#### 4.5.3. Cálculo del costo de las pérdidas para la velocidad de diseño

Con base en dos procedimientos fundamentales, el Método de Montecarlo y la Distribución de Gumbel, a continuación se explica la metodología que se usó para obtener las pérdidas.

#### 4.5.4. Cálculo de los parámetros $u$ y $\alpha$

En la Tabla 4.18 se muestran los valores que se obtienen al resolver las ecuaciones 3.19a y 3.19b, con los cuales se puede resolver la ecuación 3.17, la que permite conocer la velocidad de viento como se muestra en la Tabla 4.19.



**Tabla 4.18. Cálculo de los factores  $u$  y  $\alpha$** 

Nombre del modelo	Periodo de retorno		Periodo de retorno		$u$	$\alpha$
	Tr1	Velocidad de viento km/h	Tr1	Velocidad de viento km/h		
Torre Cancún	1/50	190	1/200	240	50.0325	0.0279
SIS Acapulco	1/50	166	1/200	190	98.815	0.581
B'LAM Cancún	1/50	190	1/200	240	50.0325	0.0279
Punta Ixtapa	1/50	190	1/200	240	50.0325	0.0279
Torre Nautilus Acapulco	1/50	166	1/200	190	98.815	0.581

#### 4.5.5. Evaluación del daño para diferentes velocidades de viento

En la Tabla 4.19, Se muestra el procedimiento de evaluación del daño de acuerdo con una cierta velocidad de viento. En la primera columna se generan un número aleatorio, con el Método de Montecarlo; en la segunda columna mediante la Función de Gumbel se calcula la velocidad de diseño. De la tercera columna hasta la cuarta columna se estima si se presenta el daño, si sobrepasa la velocidad indicada, se presenta daño y si no se considera un diseño suficiente.

Para los 5 modelos se aplica el mismo procedimiento. En la Tabla 4.19 sólo se muestra la forma general en que se obtiene el número de veces en que se daña la estructura, de acuerdo a si se sobrepasa la velocidad de diseño.

**Tabla 4.19. Cálculo del daño para diferentes velocidades de viento**

Número	Números aleatorios Método de Montecarlo (1)	Función de Gumbel (2)	Velocidad 170 km/h (3)	Velocidad 200 km/h (4)	Velocidad 250 km/h (5)
1	0.98	184.20	daño	ok	ok
2	0.99	218.39	daño	daño	ok
3	0.98	188.58	daño	ok	ok
4	0.26	39.45	ok	ok	ok
5	0.97	179.26	daño	ok	ok
6	0.34	47.48	ok	ok	ok
7	0.13	23.95	ok	ok	ok
8	0.11	21.16	ok	ok	ok
9	0.77	98.63	ok	ok	ok
10	0.53	66.03	ok	ok	ok
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
1000	0.74	92.49	ok	ok	ok

#### 4.5.6. Cálculo de la probabilidad de daño para diferentes velocidades de viento

En la Tabla 4.20 se muestra la probabilidad del daño asociado a las velocidades de diseño, y de acuerdo con el número de veces que se presenta el daño para cada velocidad. Los datos que se necesitan para obtener la probabilidad de falla provienen de la Tabla 4.19., en donde en las columnas 3, 4 y 5 se cuantificó el número de veces que se presenta el daño.

**Tabla 4.20. Cálculo del daño para diferentes velocidades de viento**

Nombre del modelo	Número veces que se presenta el daño para diferentes velocidades			Probabilidad de daño para diferentes velocidades ( $P_{fA}$ )		
	$V_R=170$ km/h	$V_R=200$ km/h	$V_R=250$ km/h	$V_R=170$ km/h	$V_R=200$ km/h	$V_R=250$ km/h
Torre Cancún	281	219	165	0.0281	0.0219	0.0165
SIS Acapulco	18	5	1	0.0018	0.0005	0.001
B'LAM Cancún	255	190	150	0.0255	0.0019	0.0015
Punta Ixtapa	23	17	14	0.0023	0.0017	0.0014
Torre Nautilus Acapulco	166	11	4	0.0166	0.0011	0.0004

#### 4.5.7. Cálculo del costo total de la estructura

Una vez que se obtiene la probabilidad de daño, se procede a realizar el cálculo del costo total de la estructura el cual incluye el costo inicial más el costo de las pérdidas. Se usan los datos de las tablas anteriores para sustituirlos en la ecuación 3.22. Los resultados de esta operación se muestran en la Tabla 4.21.

**Tabla 4.21. Cálculo del costo total de la estructura para el modelo "Torre Cancún"**

Velocidad km/h	C \$	Q	$P_{fA}$	$\gamma$	t años	$E(CT(V^2_d, t))$ Costo total \$
170	156,370,364.06	15	0.025	0.05	50	1,304,647,987.61
200	181,748,454.25	15	0.0154	0.05	50	1,003,884,883.85
250	336,135,185.07	15	0.0073	0.05	50	1,056,892,868.49

**Tabla 4.22. Cálculo del costo total de la estructura para el modelo "SIS Acapulco"**

Velocidad	C	Q	P <sub>fA</sub>	γ	t	E(CT(V <sup>2</sup> <sub>d</sub> , t))
km/h	\$				años	Costo total \$
170	155,810,426.04	15	0.0018	0.05	50	192,541,109.90
200	165,116,647.34	15	0.0001	0.05	50	174,210,429.85
250	210,820,827.49	15	0.0001	0.05	50	213,143,014.70

**Tabla 4.23. Cálculo del costo total de la estructura para el modelo "B'LAM Cancún"**

Velocidad	C	Q	P <sub>fA</sub>	γ	t	E(CT(V <sup>2</sup> <sub>d</sub> , t))
km/h	\$				años	Costo total \$
170	155,615,310.07	15	0.0255	0.05	50	1,321,202,990.95
200	191,499,225.82	15	0.0190	0.05	50	1,260,241,699.57
250	277,022,453.63	15	0.0158	0.05	50	1,562,677,634.85

**Tabla 4.24. Cálculo del costo total de la estructura para el modelo "Punta Ixtapa"**

Velocidad	C	Q	P <sub>fA</sub>	γ	t	E(CT(V <sup>2</sup> <sub>d</sub> , t))
km/h	\$				años	Costo total \$
170	183,196,066.67	15	0.0045	0.05	50	403,819,910.81
200	269,677,092.96	15	0.0012	0.05	50	404,339,206.10
250	505,534,887.32	15	0.0004	0.05	50	624,328,629.85

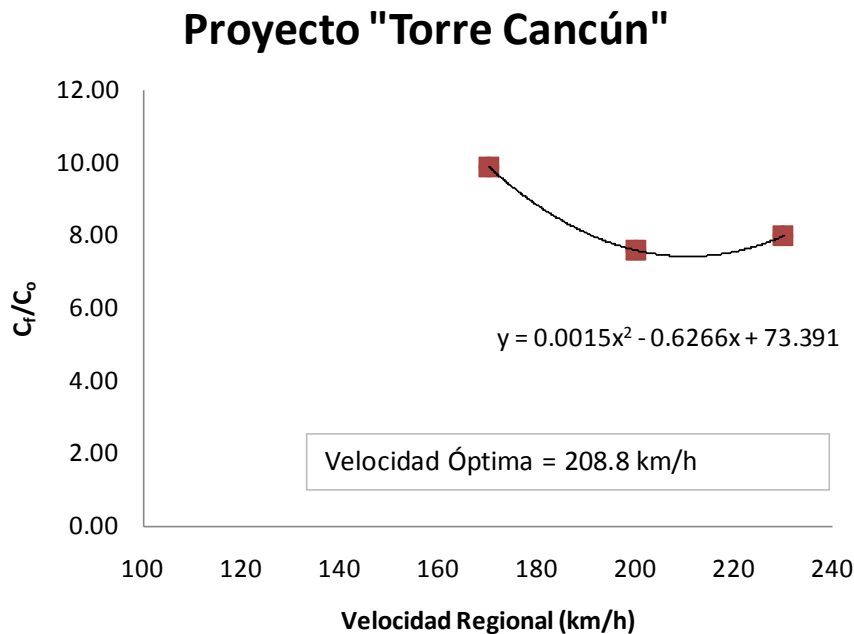
**Tabla 4.25. Cálculo del costo total de la estructura para el modelo "Torre Nautilus, Acapulco"**

Velocidad	C	Q	P <sub>fA</sub>	γ	t	E(CT(V <sup>2</sup> <sub>d</sub> , t))
km/h	\$				años	Costo total \$
170	187,378,717.21	15	0.0166	0.05	50	1,101,030,687.98
200	305,979,369.98	15	0.00110	0.05	50	404,843,164.93
250	622,803,658.83	15	0.00040	0.05	50	695,978,803.97

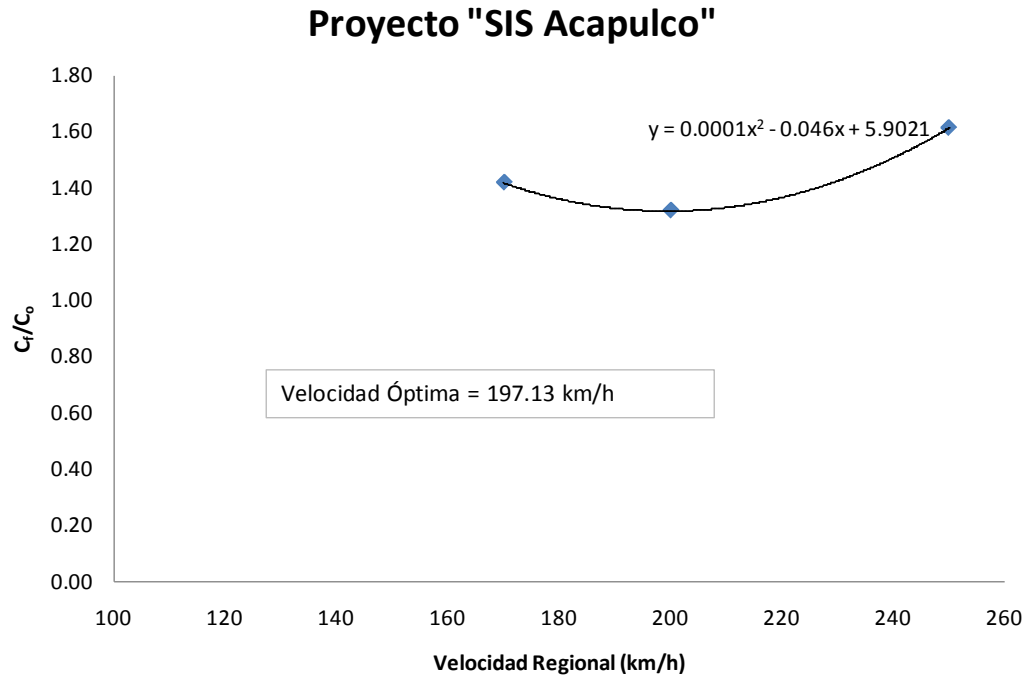
#### 4.5.8. Estimación de la velocidad óptima regional

Una vez que se obtiene el costo total de la estructura se procede a obtener la velocidad óptima regional, la que se obtiene del gráfico de la curva costo total vs la velocidad de viento (Tablas 21-24). Con estas gráficas se puede obtener una curva del tipo polinómica, junto con una ecuación del mismo tipo.

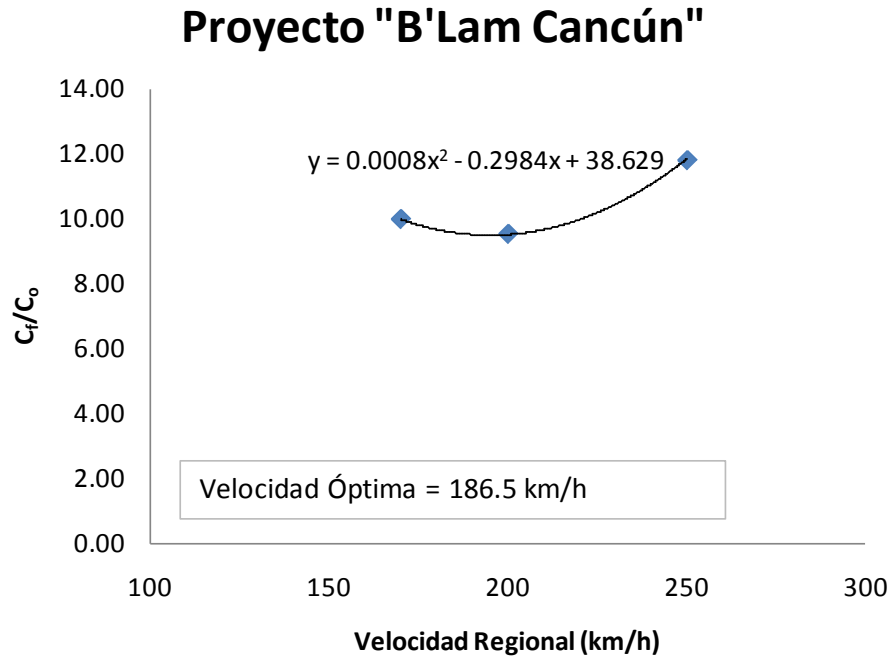
Al obtener el mínimo de la ecuación mencionada, se obtiene finalmente la velocidad óptima de diseño. Los resultados se presentan normalizando el costo total de la estructura contra el costo inicial, como se muestra en las Figuras 4.1 a 4.5.



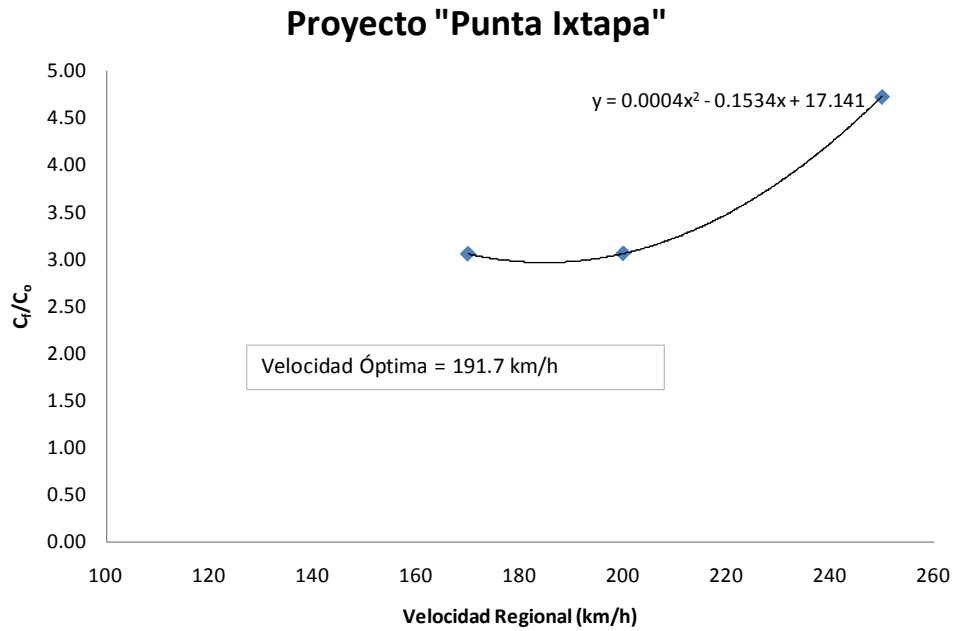
**Figura. 4.1 Gráfica de la velocidad del viento contra el costo normalizado y el cálculo de la velocidad óptima**



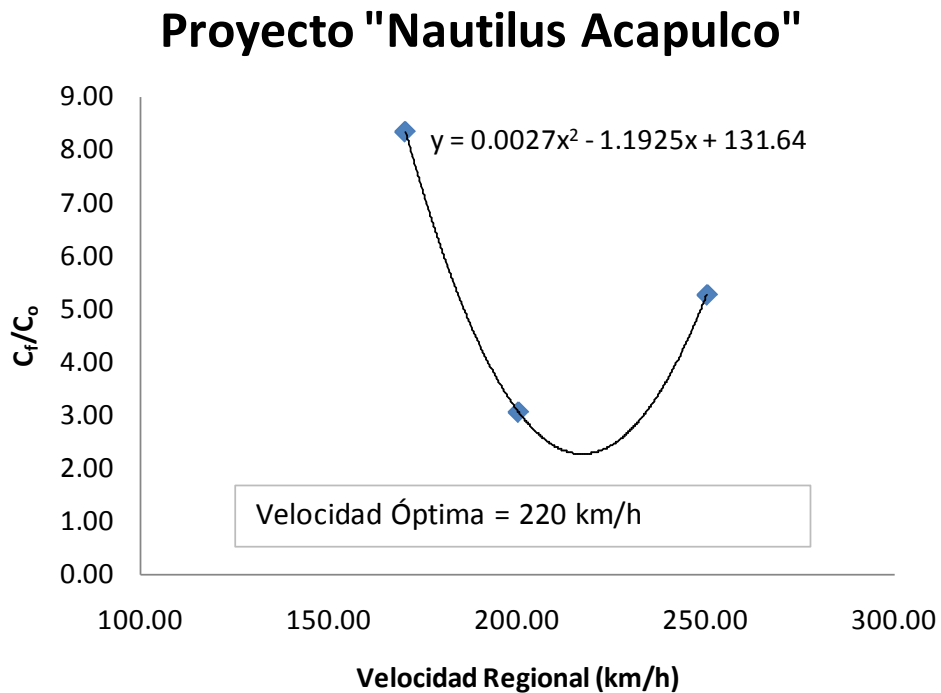
**Figura. 4.2** Gráfica de la velocidad del viento contra el costo normalizado y el cálculo de la velocidad óptima



**Figura. 4.3** Gráfica de la velocidad del viento contra el costo normalizado y el cálculo de la velocidad óptima



**Figura. 4.4** Gráfica de la velocidad del viento contra el costo normalizado y el cálculo de la velocidad óptima



**Figura. 4.5** Gráfica de la velocidad del viento contra el costo normalizado y el cálculo de la velocidad óptima

#### 4.5.9. Comparación de resultados

Enseguida se muestra una comparación de resultados entre las velocidades óptimas de diseño sugeridas por el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (2008), y los resultados que se obtuvieron con la metodología sugerida.

**Tabla 4.26. Comparación de resultados contra el Manual de CFE**

Nombre del modelo	Velocidad Regional CFE		Velocidad de diseño óptima con la metodología sugerida km/h
	Q5 km/h	Q15 km/h	
Tower Cancún	190	240	208.8
SIS Acapulco	166	190	197.1
B'LAM Cancún	190	240	186.5
Punta Ixtapa	166	190	191.7
Torre Nautilus Acapulco	166	190	220.0

Se observa en la tabla anterior que para algunos modelos la velocidad de diseño óptima obtenida con la metodología sugerida es mayor, en comparación con lo que indica el manual de CFE (2008).

En el modelo "B'LAM Cancún" la velocidad óptima es menor que la que propone el manual de la CFEDV (2008).



Con base en los dos comentarios anteriores se puede suponer que las expresiones del manual CFEDV (2008), representan una envolvente para un gran número de estructuras.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

Se seleccionaron cinco estructuras de edificios con dimensiones y características similares a los que se encuentran en la zonas costeras de la República Mexicana. Los edificios se analizaron con base en lo que indica el Manual de Obras Civiles para Diseño por Viento de la Comisión Federal de Electricidad para diferentes velocidades regionales.

Los cinco modelos se diseñaron de acuerdo con el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal, así como con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto.

Para cada modelo fue necesario obtener el costo inicial de la estructura, para una  $V_R=0$  km/h, así como para cada una de las velocidades regionales antes mencionadas.

Se utilizó la Función de Gumbel para estimar el daño con base en una simulación de Montecarlo.

Se obtuvo la probabilidad de daño para cada velocidad regional. Con la probabilidad se aplicó la ecuación del costo de ciclo de vida, lo que dió como resultado el costo esperado en el cual, se incluye el costo inicial más el costo de las pérdidas.

Después se graficaron los resultados del costo del ciclo de vida contra las velocidades regionales para las que se diseñaron los modelos. A esta gráfica se le ajustó una curva del tipo polinómica y se obtuvo el mínimo. La solución de esta curva es la velocidad de diseño óptima.

El procedimiento presentado muestra que no se puede ajustar una sola curva a todas las estructuras, como lo indica el Manual de la Comisión Federal de Electricidad para Diseño por Viento. El manual propone una envolvente para cualquier tipo de estructuras.

En la tabla 4.20 se observa que para cada modelo no existe una tendencia lineal de acuerdo con el incremento de la velocidad. Lo que provoca que el comportamiento no lineal del daño sea muy complicado estimarlo. Sin embargo con esta propuesta se puede refinar la velocidad óptima de diseño, repitiendo el procedimiento tantas veces como se desee, hasta encontrar un promedio de la Velocidad de Diseño Óptima

La Velocidad de Diseño Óptima es sensible a la simulación del viento adoptada y a las propiedades dinámicas. Como se muestra en la Tabla 4.26, por ejemplo los modelos "B'Lam Cancún", "Punta Ixtapa" y "Torre Nautilus Acapulco" que tienen una altura similar, no cuentan con las mismas propiedades dinámicas como se muestra en la Tabla 4.4, por lo que da como resultado una variación sensible en la Velocidad Óptima de Diseño.

Otro punto a considerar en la estimación del daño, es que los elementos no estructurales pudieran ser más sensibles a las fuerzas de viento entre una estructura y otra, aunque las dos estructuras tuvieran las mismas propiedades dinámicas.

Los resultados de la metodología empleada pueden ser más exactos si se obtienen estadísticas de los daños que presentan diferentes estructuras, así como el costo de su reparación.

La metodología empleada se puede aplicar a cualquier tipo de estructura, además de que se podrían obtener mapas de riesgos para cada zona de la República Mexicana, así como para cada tipo de estructuras.

En caso de ser necesario se puede evaluar el nivel de riesgo con que se diseña cualquier estructura, de tal forma que el propietario del inmueble puede tomar la decisión de invertir en una estructura con cierto nivel de daño esperado, de acuerdo al riesgo que esté dispuesto a tomar.

Esta propuesta es de fácil y rápida aplicación, lo que nos permite llevarla a los despachos de cálculo, con la intención de obtener datos suficientes, tanto para refinar el procedimiento, así como para encontrar velocidades de diseño que permitan hacer análisis y diseños más refinados.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

Mejorar la simulación de las fuerzas de viento, ya que se empleó un modelo muy básico.

Realizar estudios de diseño óptimo para diferentes tipos de estructuras.

Para la elaboración de esta investigación, fue muy complicado encontrar literatura sobre la evaluación del daño debido al viento en las estructuras, por lo que se recomienda proponer nuevas metodologías en busca de optimizar el daño debido a fenómenos hidrometeorológicos.

Es necesario aplicar esta metodología a una gran cantidad de estructuras para obtener velocidades óptimas dependiendo del tipo de inmueble que se desee estudiar.

## REFERENCIAS

- Pozos, A., Gómez, R. y Hong, H. P. (2010) "Cost-effectiveness of tuned mass dampers considering different wind-induced motion serviceability levels" Proceedings of the International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management, Tongji University in Shanghai China, ISRERM september 2010.
- ASCE (2002) "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures" American Society of Civil Engineers (ASCE) (2002).
- CFEDV (2008) "Manual de diseño de Obras Civiles para diseño por viento, de la Comisión Federal de Electricidad", México.
- Hernández, J., Fernández, Ma. y Albizuri, J. (2005) "Estructuras y efectos dinámicos del viento" Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del País Vasco
- William, (1971), Doctoral thesis "Wind-Induced Motion and Human Discomfort in Tall Buildings" Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Civil Engineering, Editorial, Cambridge, M.I.T. Dept. of Civil Engineering, 1971,
- Meseguer Ruiz et al. (2001) "Aerodinámica Civil" Instituto Universitario <Ignacio Da Riva> IDR/UPM ETIS Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid
- NBCC (1995) "Wind Load Provision, National Building Code of Canada", (1995).
- NTCDV (2004), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento", (diciembre 2004).
- NTCDCEC (2004), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de concreto, (diciembre 2004).
- Pindado, S. (2003) Tesis Doctoral "Uso de Parapetos para la Reducción de la Succión Producida por el Viento en Cubiertas de Edificios" Departamento de Infraestructura, Sistemas Aeroespaciales y Aeropuertos. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos.
- RCDF (2004) Reglamento de Construcciones del Distrito Federal
- Rosenblueth, E. 1976. "Optimum design for infrequent disturbances". J. Struct. Div., ASCE, 102(9):1807-1825
- Simiu, E. y Scanlan, R. Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design. 3ª edición. Publicaciones Wiley-Interscience. E.U.A. 1996.
- Varela, L. (2005) "Ingeniería de costos, Teoría y Práctica en la Construcción" Editorial Trillas
- T.T. Soong a, B.F. Spencer Jr b. (2002) "Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice" Engineering Structures 24 (2002) 243-259

Varela, A. (2009) "Ingeniería de costos: teoría y práctica en construcción" Editorial Trillas, México D. F. pag.13-50