



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Comparación de la respuesta estructural inducida por el viento empleando normatividad y simulación

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Alan Yair Pérez León

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Adrián Pozos Estrada



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/070/16

Señor
ALAN YAIR PÉREZ LEÓN
Presente

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

**"COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL INDUCIDA POR EL VIENTO EMPLEANDO
NORMATIVIDAD Y SIMULACIÓN"**

- INTRODUCCIÓN
- I. CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO
- II. NORMATIVIDAD PARA DISEÑO POR LA ACCIÓN DEL VIENTO
- III. RESPUESTA DE ESTRUCTURAS ANTE EL EFECTO DEL VIENTO
- IV. MODELACIÓN ANALÍTICA Y MATEMÁTICA DE OSCILADORES SOMETIDOS AL VIENTO
- V. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS
- VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 29 de agosto del 2016.
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. Agustín Demeneghi Colina
Secretario: M.I. Héctor Sanginés García
Vocal: Dr. Adrián Pozos Estrada
1^{er.} Suplente: M.I. Miguel Ángel Zúñiga Bravo
2^{do.} Suplente: M.I. Rodrigo Takashi Sepulveda Hirose

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

TUTOR DE TESIS:

ADRIÁN POZOS ESTRADA

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

*A mis padres **Elena** y **Jaime** por todo el amor, cariño y apoyo que siempre me dieron, además por el esfuerzo que hicieron para brindarme una educación y hacerme un hombre de bien.*

*A mi hermano **Daniel** por siempre contar con su apoyo.*

*A mi sobrina **Daniela** por darme el último aliento para terminar mi carrera.*

*A mis **Tías** y **Tíos** por todo el apoyo que ofrecieron a mis padres y a mí a lo largo de mi carrera.*

*Con profundo agradecimiento a mi alma mater, la **Universidad Nacional Autónoma de México** por haberme aceptado y distinguirme con una matrícula.*

*A la **Facultad de Ingeniería** por haberme abierto las puertas de todas sus aulas, laboratorios y por todos los recursos que me brindó para contribuir a mi formación profesional.*

*Al **Instituto de Ingeniería de la UNAM** y en especial al departamento de **Ingeniería de Viento** por todas las facilidades que me brindó durante la realización de este trabajo y por ayudarme a culminar mis estudios.*

*Al **Dr. Adrián Pozos Estrada**, por apoyarme desde la realización de mi servicio social, por compartirme su conocimiento, por la paciencia y amistad que me brindó para finalizar mis estudios.*

*A mis **Profesores** en la **Facultad de Ingeniería** por todas sus enseñanzas para poder convertirme en un buen ingeniero.*

CONTENIDO

Resumen.....	9
Abstract	9
INTRODUCCIÓN	10
OBJETIVO.....	11
1.0 CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO	12
1.1 Viento	13
1.2 Viento Global.....	14
1.3 Viento Local.....	15
1.4 Viento Estacional.....	16
1.5 Clasificación del viento de acuerdo a su velocidad	18
1.5.1 Escala de Beaufort del Viento	18
1.6 Huracanes.....	18
1.6.1 Clasificación de Huracanes.....	19
1.7 Tornados.....	21
1.7.1 Clasificación de Tornados.....	21
2.0 Normatividad para diseño por Viento.....	22
2.1 Criterios de diseño	23
2.2 Acciones de diseño.....	23
2.3 Clasificación de las estructuras	24
2.3.1 De acuerdo a su importancia	24
2.3.2 De acuerdo con su respuesta ante la acción del viento.....	25
2.4 Efectos a considerar	25
2.5 Estudio en túnel de viento	26
2.6 Método Estático para diseño por viento.....	26
2.6.1 Determinación de la velocidad de diseño.....	26
2.6.2 Tipos de Terreno	27
2.6.3 Factor de variación con la altura	28
2.6.4 Factor correctivo por topografía y rugosidad FTR.....	29
2.6.5 Determinación de la presión de diseño	30

2.6.6	Factores de presión	30
2.7	Desplazamientos permisibles.....	31
3.0	Respuesta de las estructuras al efecto del viento.....	32
3.1	Sistema lineal de un grado de libertad.....	33
3.2	Dinámica de Osciladores	35
3.2.1	Sistemas Dinámicos.....	35
3.2.2	Sistemas Oscilatorios.....	36
3.2.3	Osciladores lineales.....	36
3.2.4	Oscilador Armónico Simple	36
3.2.5	Oscilador Armónico Amortiguado.....	37
3.2.6	Oscilador Armónico Forzado	40
3.3	Factor de Respuesta de Ráfaga	41
3.4	Solución numérica de la ecuación de movimiento dinámico	44
3.4.1	Método de Newmark para sistemas lineales.....	44
4.0	Modelación analítica y matemática de osciladores sometidos a viento	46
4.1	Modelos de base de datos	47
4.2	Consideraciones generales para la modelación de edificios.....	53
4.3	Análisis empleando el Factor de Amplificación Dinámica.....	53
4.4	Programación con MATLAB para Análisis Dinámico	57
5.0	ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	61
5.1	Comparación de resultados de la modelación analítica y matemática de osciladores sometidos al viento	62
6.0	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	67
6.1	Conclusiones.....	68
6.2	Recomendaciones	69
	Referencias bibliográficas	70
	Apéndice A	72
	Cálculo del factor de amplificación dinámica (G) para los 10 edificios analizados empleando la definición de velocidad a la altura de la estructura (VH) de acuerdo al CÓDIGO CANADIENSE (NBCC, 2005)	72

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1.1: VIENTOS GLOBALES (COPESA 2008)	15
ILUSTRACIÓN 1.2: VIENTOS LOCALES (COPESA 2008)	15
ILUSTRACIÓN 1.3: REPRESENTACIÓN DE UN CICLÓN (COPESA 2008)	17
ILUSTRACIÓN 1.4: REPRESENTACIÓN DE UN ANTICICLÓN (COPESA 2008)	17
ILUSTRACIÓN 2.1: TIPOS DE TERRENO (INIFED-2011)	28
ILUSTRACIÓN 2.2: TIPOS DE TOPOGRAFÍA (NTC-DV-2004)	29
ILUSTRACIÓN 3.1: MODELO DE UN SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD	33
ILUSTRACIÓN 3.2: MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE (UNIVALLE 2006)	35
ILUSTRACIÓN 3.3: OSCILADOR ARMÓNICO SIMPLE (MATLAB 2011)	37
ILUSTRACIÓN 3.4: OSCILACIÓN ARMÓNICA AMORTIGUADA (MATLAB 2011)	39
ILUSTRACIÓN 3.5: SISTEMA CRÍTICAMENTE AMORTIGUADO (MATLAB 2011)	39
ILUSTRACIÓN 3.6: SISTEMA SOBREAMORTIGUADO (MATLAB 2011)	40
ILUSTRACIÓN 3.7: CURVAS DE UN OSCILADOR ARMÓNICO FORZADO (UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS 2002)	41
ILUSTRACIÓN 3.8: ESQUEMA DE SOLUCIÓN DE LA TEORÍA ESTADÍSTICA ESPECTRAL (SOCIEDAD MEXICANA DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL 2004)	44
ILUSTRACIÓN 4.1: PLANTAS DE MODELOS DE EDIFICIOS	50
ILUSTRACIÓN 4.2: ISOMÉTRICO DE MODELOS DE EDIFICIOS	51
ILUSTRACIÓN 4.3: REPRESENTACIÓN DE LA ALTURA DE MODELOS DE EDIFICIOS.	52
ILUSTRACIÓN 4.4: PROPIEDADES DE MODELACIÓN EN PROGRAMA GÉNESIS SIMVT.	54
ILUSTRACIÓN 4.5: ANÁLISIS ESTÁTICO EN PROGRAMA GÉNESIS SIMVT.	54

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1: CLASIFICACIÓN DE BEAUFORT	18
TABLA 1.2: CLASIFICACIÓN DE CICLONES TROPICALES.....	19
TABLA 1.3: CLASIFICACIÓN DE HURACANES.	20
TABLA 1.4: CLASIFICACIÓN DE TORNADOS.....	21
TABLA 2.1: TIPOS DE ACCIONES.	23
TABLA 2.2: CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS EN EL RCDF.	24
TABLA 2.3: CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE ACUERDO A SU RESPUESTA AL VIENTO.....	25
TABLA 2.4: VELOCIDADES REGIONALES, VR, SEGÚN LA IMPORTANCIA DE LA CONSTRUCCIÓN Y LA ZONIFICACIÓN EÓLICA, M/S	27
TABLA 2.5: COEFICIENTES A Y Δ EN FUNCIÓN DE LA RUGOSIDAD DEL TERRENO.	27
TABLA 2.6: FACTOR DE TOPOGRAFÍA Y RUGOSIDAD DEL TERRENO.....	29
TABLA 2.7: COEFICIENTES CP PARA EDIFICIOS Y CONSTRUCCIONES CERRADAS	30
TABLA 3.1: PARÁMETROS SEGÚN LA CONDICIÓN DE EXPOSICIÓN.....	43
TABLA 4.1: SELECCIÓN DE BASE DE DATOS.....	48
TABLA 4.2: EDIFICIOS SELECCIONADOS PARA LA MODELACIÓN.	49
TABLA 4.3: CONSIDERACIONES GENERALES.....	53
TABLA 4.4: RESULTADOS ANÁLISIS ESTÁTICO.	55
TABLA 4.5: VERIFICACIÓN FACTOR DE RESPUESTA DE RÁFAGA	56
TABLA 4.6: DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS.....	58
TABLA 4.7: PROMEDIO DE MÁXIMOS.	59
TABLA 5.1: COMPARACIÓN FACTOR DE RESPUESTA DE RÁFAGA.....	62
TABLA 5.2: COMPARACIÓN DE ANÁLISIS.....	66

NOMENCLATURA

\ddot{u}	Aceleración
\dot{u}	Velocidad
∞	Indeterminado
A	Amplitud
NTC-DV	Normas Técnicas Complementarias Diseño por Viento
Angcos	Coseno inverso
b	base del edificio
c	Coefficiente de amortiguamiento
C_{Cr}	Coefficiente de amortiguamiento crítico
C_p	Coefficiente local de presión
d	Dimensión mínima de la base
f	Frecuencia
F_A	Fuerza de amortiguamiento
F_I	Fuerza de inercia
F_R	Fuerza generada por la rigidez
ft	Pies
FTR	Factor Correctivo
F_α	Factor de variación de la velocidad con la altura
G	Factor de respuesta de ráfaga
H	Altura del Edificio
k	Rigidez
kg	Kilogramos
km	Kilómetros
km/h	Kilómetros por hora
Ln	Logaritmo natural
m	Masa
m	Metros
m ²	Metros cuadrados
Mb	Milibar
Mph	Millas por hora
P	Fuerza del viento turbulento
Pa	Pascales
pz	Presión de Diseño
T	Periodo fundamental
t	Tiempo
u	Desplazamiento
VD	Velocidad de Diseño
VR	Velocidad regional
w	Ancho del edificio
z	Altura
A	Exponente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura.
γ	Densidad promedio de edificios
δ	Gradiente de altura
ξ	Constante de amortiguamiento
Π	Pi
Ω	Frecuencia circular

RESUMEN

Se realizó el análisis de diez edificios reales ante los efectos del viento, empleando las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento (NTCDV, 2004) del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF) y un método de análisis dinámico, con el objetivo de comparar la respuesta. Los edificios se modelaron como sistemas de un grado de libertad. Para los análisis con las NTCDV (2004) se empleó el programa Génesis SimVT y para los análisis dinámicos se empleó un programa desarrollado en MATLAB. Los resultados muestran que la respuesta obtenida con los análisis dinámicos es sensiblemente mayor que la obtenida aplicando las NTCDV (2004).

ABSTRACT

The analyses of ten real buildings under wind effects was carried out, by using the *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento* (NTCDV, 2004) from the Federal District Construction Code (RCDF) and a method of dynamic analysis, with the aim of comparing the response. The buildings were modeled as single degree of freedom systems. For the analysis with the NTCDV (2004) the program Génesis SimVT was employed and for the dynamic analysis a program developed in MATLAB was used. The results show that the response obtained with the dynamic analysis is slightly greater than that obtained by using the NTCDV (2004).

INTRODUCCIÓN

Esta investigación está encaminada a conocer cómo los efectos del viento afectan en las edificaciones, conocer cuáles son los factores más importantes que intervienen en el cálculo de las fuerzas de viento y cómo es que influyen en un diseño viento-resistente.

A lo largo de muchos años se ha desarrollado el estudio y análisis de la actividad sísmica en nuestro país debido a que vivimos en un país en donde tenemos una actividad sísmica importante, pero las acciones del viento se presentan en cualquier parte del mundo, y en algunos lugares la acción del viento puede más importante que la actividad sísmica. Por lo anterior, el diseño viento-resistente nunca se puede dejar de lado en ningún proyecto estructural.

El análisis y caracterización del viento turbulento se desarrolló en gran medida en décadas pasadas, sobre todo en regiones que son muy propensas a este efecto. Resulta importante mencionar que en varios proyectos estructurales se adopta reglamentación para el diseño por viento de otros lugares del mundo, que no toman en cuenta los efectos del viento en el sitio donde se desplantará la estructura. Lo anterior no siempre garantizará un nivel adecuado de seguridad de la estructura diseñada.

En el capítulo 1 de este trabajo se presentan algunos aspectos generales de la caracterización del viento. En este capítulo también se describen de manera general algunos de los fenómenos naturales que causan vientos intensos.

Detalles de la normatividad empleada en la ciudad de México para el diseño por viento se presentan en el capítulo 2.

El capítulo 3 presenta aspectos generales del efecto del viento en estructuras, se describen las ecuaciones de movimiento de osciladores y se discute el factor de ráfaga que se emplea en las NTCDV (2004). En este capítulo también se describe el método de Newmark, el cual fue implementado para realizar los análisis dinámicos.

El capítulo 4 presenta la modelación analítica y matemática de las estructuras sometidas a viento.

Los análisis de los resultados obtenidos se presentan en el capítulo 5.

Finalmente, las conclusiones y recomendaciones de este estudio se presentan en el capítulo 6.

OBJETIVO

El objetivo principal de este trabajo de investigación es explicar los aspectos fundamentales del efecto del viento en edificios de forma simplificada con la intención de comparar la respuesta estructural inducida por el viento obtenida de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Viento y empleando fuerzas de viento simuladas, de tal modo que se pueda representar cualquier edificación sobre la Ciudad de México de forma que cumpla con la normatividad.

1.0 CARACTERIZACIÓN DEL VIENTO

1.1 Viento

El viento es un movimiento horizontal de masas de aire debido a diferencias de presión en las distintas zonas de la atmósfera y a la rotación terrestre. Al movimiento de las masas de aire en cualquier otra dirección que no sea horizontal se le denominan corrientes de aire.

Existen cuatro características del viento que se pueden medir:

- **La dirección** en que se desplaza el viento
- **La velocidad** a la que se desplaza
- **El tipo**, ya sean ráfagas o rachas
- **Los cambios** que el viento sufre

Estos últimos, en la superficie se miden con veletas y anemómetros, mientras que los de gran altitud se detectan con globos, sondas o dispositivos satelitales.

Los vientos tienen su origen en las diferencias de la presión atmosférica que se producen por las distintas temperaturas en el aire. El aire frío tiende a desplazarse hacia abajo, mientras que el aire caliente se desplaza hacia arriba, lo que conlleva al movimiento del aire y se le denomina viento.

En la Tierra, la variación en la distribución de presión y temperatura se debe en gran medida a la diferencia de la distribución del calentamiento solar, junto a las diferentes propiedades térmicas de la superficie terrestre y oceánica. Cuando las temperaturas de regiones contiguas son distintas (zonas más calientes que otras), el aire más caliente normalmente asciende sobre el más frío y por ello se dice que es más denso. Estos vientos son afectados por la rotación de la Tierra (efecto de Coriolis), lo que da como resultado diferentes tipos de circulación de los vientos sobre la Tierra.

La dirección del viento no es fija, esta oscila en torno a una dirección media que se toma como referencia. Para definirla comúnmente se usa la rosa de vientos de ocho direcciones

El viento al ser aire en movimiento, está conformado por millones de partículas que se desplazan a diferente velocidad, por ello la velocidad se refiere a valores medios. Un aspecto de la velocidad son los valores máximos instantáneos, que se denominan rachas que implican una desviación temporal de la velocidad respecto a su valor medio. Otro aspecto son las ráfagas, que tienen como característica la fuerte intensidad, la corta duración y su presencia repentina.

La dirección y velocidad del viento es el resultado de la intervención de las siguientes fuerzas:

- **Fuerza por el gradiente horizontal de presión**, esta fuerza se dirige desde las isobaras de alta a baja presión, generando una dirección perpendicular a las mismas.

- **Fuerza de Coriolis**, producida por la rotación terrestre, la trayectoria del viento sufre una desviación hacia la derecha en el hemisferio norte (en sentido contrario en el hemisferio sur).
- **Fuerza centrífuga**, generada por la curvatura de las isobaras, esta fuerza actúa de acuerdo a la dirección del radio de curvatura de la trayectoria del viento, en sentido opuesto al centro de curvatura de la misma trayectoria.
- **Fuerza de rozamiento**, se origina en la zona baja de la atmósfera, esta fuerza depende de factores como el tipo de superficie o la orografía.

Como se ha mencionado, el viento se produce por causas naturales y existen algunos vientos que son muy bien conocidos, que son parte funcional del ciclo natural que regula la atmósfera.

Los vientos pueden clasificarse en tres clases principales:

- Vientos Globales
- Vientos Locales
- Vientos Estacionales

1.2 Viento Global

También conocido como viento planetario, es consecuencia del movimiento de rotación terrestre. Este tipo de viento se desplaza ocupando grandes extensiones de la superficie terrestre y se caracteriza por ser constante en su dirección y facilitar así el tránsito de energía calórica.

De este tipo de viento se clasifican otros tres:

1. **Viento alisio**, este va desde los trópicos hacia el Ecuador. Abarca una gran extensión de superficie oceánica en su recorrido, lo que produce que cargue con gran humedad que resulta en lluvia.
2. **Viento contralisio**, este va desde los trópicos hacia los círculos polares. Este viento es cálido, pero también carga una gran cantidad de humedad y también provoca lluvias.
3. **Viento circumpolar**, este circula desde los polos terrestres hacia los círculos polares. Lo que provoca que sea muy frío, y se crea debido a la inclinación del eje de la tierra.

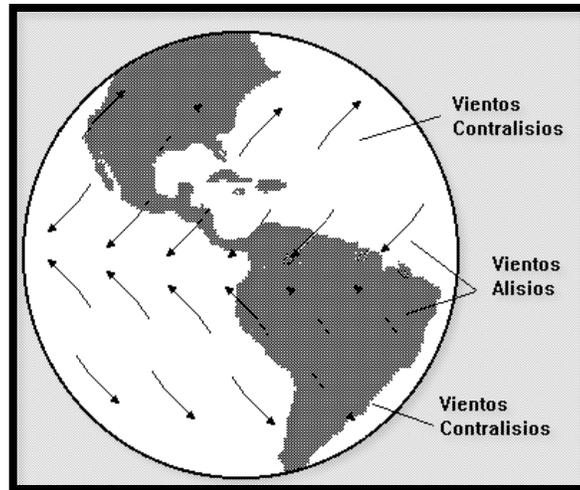


ILUSTRACIÓN 1.1: VIENTOS GLOBALES (COPESA 2008)

1.3 Viento Local

Guardan mucha semejanza a las variaciones estacionales de temperatura y presión entre la tierra y las masas oceánicas, hay cambios diarios que generan efectos similares, pero más localizados. Este viento afecta pequeñas zonas territoriales.

De este viento se pueden clasificar otros dos:

1. **Brisa terrestre y marina**, tienen presencia en las costas y se produce por el cambio en la temperatura en las masas de agua y la superficie de la tierra.
2. **Brisa de montaña y de valle**, se derivan del calentamiento del aire y por la insolación en zonas cumbres, fondos y cabeceras en los valles.

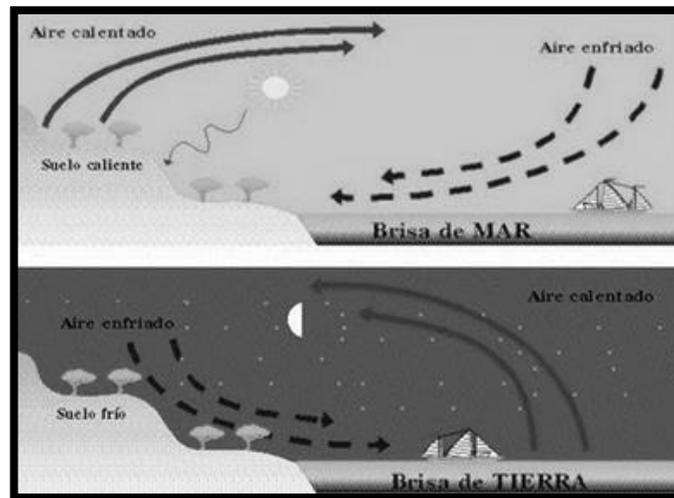


ILUSTRACIÓN 1.2: VIENTOS LOCALES (COPESA 2008)

1.4 Viento Estacional

También denominado viento regional, es prácticamente referenciado a las cuatro estaciones por las que pasa la tierra en su traslación, por eso el aire sobre la tierra es más cálido en verano y más frío en invierno. Así, durante el verano, en los continentes se genera baja presión y por ellos los vientos se desplazan desde los océanos, que están más fríos, caso contrario en invierno, en donde los continentes retienen presiones altas y los vientos se dirigen hacia los océanos, que entonces son más cálidos.

De este tipo de viento se pueden clasificar otros cuatro:

1. **Brisas continentales y oceánicas**, en dónde dominan las continentales que producen heladas y soplan en zonas lejanas de los mares y las oceánicas que se producen en las costas e inducen un cambio constante de temperatura.
2. **Monzones**, también conocidos como vientos periódicos, se originan al cambiar de temperatura más rápido que el agua, en verano el aire comienza ascender sobre la tierra y provoca un área de baja presión, dando lugar a un ciclón estacional. Es un tipo de viento muy particular, pero con características muy generales.
3. **Ciclones**, son masas de aire cálidas y húmedas, de baja presión y con un peso específico menor que asciende a la atmósfera, las cuales lo hacen por dos razones, porque está más caliente que el entorno o porque se ve empujada hacia arriba. Por ello mismo tenemos dos tipos de ciclones:
 - **Ciclón Térmico**, es la masa de aire que asciende porque está más caliente que el entorno. Es típica de las regiones tropicales y conlleva un tiempo nuboso, lluvioso y cálido. Cuando la diferencia con el entorno es muy grande, como sucede sobre en los mares tropicales tras el calentamiento en verano, se producen huracanes, y tormentas tropicales, con vientos muy fuertes.
 - **Ciclón Dinámico**, es la masa de aire cálida que asciende porque es empujada hacia arriba por el aire polar que está en movimiento. Hace que se produzca el llamado Frente Polar y conlleva un tipo de tiempo nuboso, lluvioso y frío. Puede llegar a ser muy potente y tener asociados vientos que van desde suaves a fuertes, pero difícilmente se convierten en huracanes.
4. **Anticiclones**, son masas de aire frías y secas de alta presión, y de mayor peso específico que descienden corteza terrestre, pueden descender por dos razones, o porque está más fría que el entorno o porque se ve empujada hacia abajo. Por ello hay dos tipos de anticiclones:
 - **Anticiclón Térmico**, es una masa de aire que desciende porque está más fría que el entorno. Típico en regiones polares, en general mientras el aire desciende se va calentando, pero cuando el suelo está muy frío se puede

formar una inversión térmica, en la que las capas superiores de la atmósfera están más calientes que las inferiores.

- **Anticiclón Dinámico**, es una masa de aire que desciende porque es empujada hacia abajo a causa del choque del aire frío de un frente polar y el aire tropical. Mientras desciende se va calentando y secando. Son característicos de los grandes desiertos de arena, y de latitudes medias en verano.

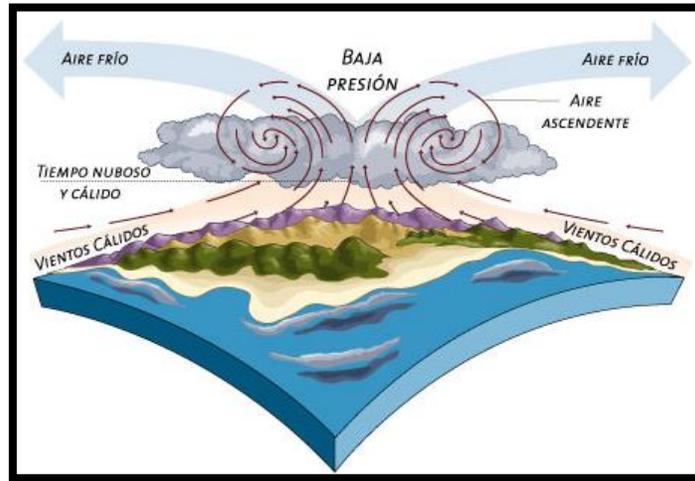


ILUSTRACIÓN 1.3: REPRESENTACIÓN DE UN CICLÓN (COPESA 2008)

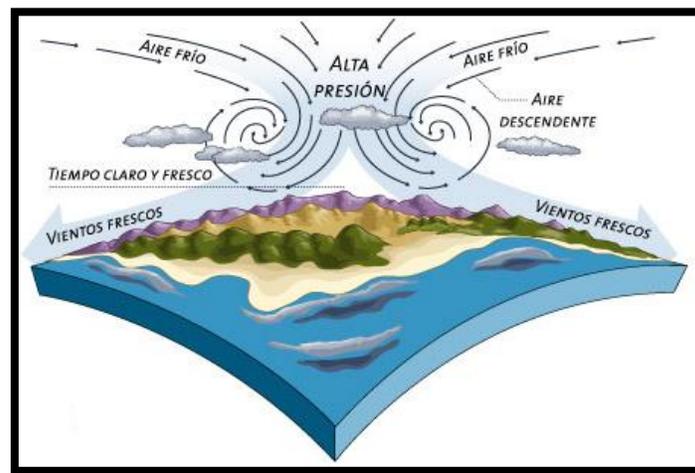


ILUSTRACIÓN 1.4: REPRESENTACIÓN DE UN ANTICICLÓN (COPESA 2008)

1.5 Clasificación del viento de acuerdo a su velocidad

1.5.1 Escala de Beaufort del Viento

La velocidad del viento se mide usando una escala de 0-12 con base en evidencias visuales establecidas originalmente en 1806 por Sir Francis Beaufort, quien desarrolló un sistema de intensidad para determinar en forma precisa la velocidad del viento. Este sistema fue desarrollado por marineros, pero fue modificado por el Servicio Meteorológico Nacional para que se usará también en tierra firme. La escala se presenta en la tabla 1.1.

Escala de Beaufort				
Grados	Velocidad(km/h)	Descripción	Presión	Apreciación
0	0-1	Calma	...	El humo se eleva verticalmente
1	2-3	Ventolina	0.13	El viento inclina el humo, pero no hace girar las veletas
2	6-11	Flojito	0.8	Las hojas se mueven, el aire se siente en el rostro
3	12-19	Flojo	3.2	Las hojas y ramas pequeñas se mueven continuamente
4	20-28	Fresco	6.4	El viento levanta el polvo y hojas
5	29-38	Fresquillo	13	Los árboles pequeños empiezan a balancearse
6	39-49	Bonacible	22	Se mueven las ramas grandes, resulta difícil usar paraguas
7	50-61	Frescachón	33	Los árboles se agitan, se hace difícil mirar cara al viento
8	62-74	Duro	52	Se rompen las ramas pequeñas de los árboles, se hace difícil caminar
9	75-88	Muy Duro	69	Las ramas medianas de los árboles se quiebran
10	89-102	Temporal	95	Los árboles son arrancados y las techumbres sufren daños
11	103-117	Borrasca	117	Destrozos extremos
12	118-133	Huracán	160	Idem

TABLA 1.1: CLASIFICACIÓN DE BEAUFORT

1.6 Huracanes

Un huracán es el más severo de los fenómenos meteorológicos, son conocidos como ciclones tropicales. Estos son sistemas de baja presión con actividad lluviosa y eléctrica, sus vientos rotan antihorariamente en el hemisferio Norte. Un ciclón tropical con vientos menores o iguales a 62 km/h es denominado como una depresión tropical. Cuando los vientos alcanzan velocidades de 63 a 117 km/h se llama tormenta tropical y, al exceder los 118 km/h, la

tormenta tropical se convierte en huracán. La tabla 1.2 presenta una clasificación de los ciclones tropicales.

Clasificación de Ciclones Tropicales	
Categoría	Característica
Depresión Tropical	Ciclón tropical en el que el viento medio máximo a nivel de la superficie del mar (velocidad promedio en un minuto) es de 62 km
Tormenta Tropical	Ciclón tropical bien organizado de núcleo caliente en el que el viento promedio máximo a nivel de la superficie del mar (velocidad promedio en un minuto) es de 63 a 117 km/h.
Huracán	Ciclón tropical de núcleo caliente en el que el viento máximo promedio a nivel del mar (velocidad promedio en un minuto) es de 118 km/h o superior. A su vez se subdivide en 5 categorías.

TABLA 1.2: CLASIFICACIÓN DE CICLONES TROPICALES.

1.6.1 Clasificación de Huracanes

La Escala de Huracanes Saffir-Simpson se utiliza para describir la magnitud de la fuerza de los huracanes en el Pacífico Este y Atlántico. Otras escalas se usan en otras áreas del mundo. La escala clasifica a los huracanes basándose primordialmente en la velocidad del viento, presión, y la altura de la marejada de la tormenta. Los huracanes más pequeños tienen velocidades del viento de 74 mph (119 km/h) mientras que los huracanes más grandes tienen velocidades del viento mayores a 155 mph (250 km/h). La tabla 1.3 presenta la clasificación de huracanes de Saffir-Simpson.

CLASIFICACIÓN DE HURACANES				
CATEGORÍA	PRESIÓN CENTRAL (mb)	VIENTO (mph)	MAREJADA DE TORMENTA (ft)	DAÑO
1: Mínimo	>980	74-95	4-5	Fundamentalmente daño a árboles, arbustos, y casas rodantes sin anclaje.
2: Moderado	965-979	96-110	6-8	Algunos árboles caídos, daño importante a casas rodantes expuestas, cierto daño en los techos de algunas edificaciones.
3: Extensivo	945-964	111-130	6-8	Follaje de los árboles arrancado, grandes árboles caídos, casas móviles destruidas, cierto daño de estructura a edificaciones pequeñas.
4: Extremo	920-944	131-155	13-18	Todas las señalizaciones arrancadas, daño extensivo a techos, ventanas y puertas; total destrucción de casas rodantes, inundaciones de hasta 6 millas tierra adentro, extenso daño a pisos inferiores de estructuras cerca de la costa.
5: Catastrófico	<920	>155	>18	Daño severo a ventanas y puertas, daño extensivo a techos de viviendas y edificios industriales, edificaciones pequeñas volteadas y arrastradas, daño significativo a pisos inferiores en todas las estructuras a menos de 15 pies sobre el nivel del mar a 500 yardas de la costa.

TABLA 1.3: CLASIFICACIÓN DE HURACANES.

1.7 Tornados

Un tornado es un fenómeno meteorológico que se presenta como una columna de aire que gira y se desplaza de forma violenta, y por tanto es muy peligrosa. Está en contacto tanto con la superficie de la Tierra como con una nube cumulonimbus o, excepcionalmente, con la base de una nube cúmulus. Son considerados los fenómenos atmosféricos más intensos, los tornados se manifiestan de diferentes tamaños y formas, pero generalmente parecen una nube en forma de embudo, cuyo extremo más angosto toca el suelo y suele estar rodeado por una nube de desechos y polvo.

1.7.1 Clasificación de Tornados

Los tornados se clasifican por la escala Fujita mejorada (escala EF), así como los huracanes se miden de acuerdo a los daños que provocan, y van desde EF0 hasta EF5. La tabla 1.4 presenta la escala de Fujita.

CLASIFICACIÓN DE TORNADOS			
Número en la escala F	Intensidad	Viento (mph)	Daño
0	Vendaval	60-100	Daños en chimeneas, rotura de ramas, árboles pequeños rotos, daños en señales y rótulos.
1	Tornado moderado	73-112	El límite inferior es el comienzo de la velocidad del viento en un huracán. Arranca partes de algunos tejados, mueve coches y autocaravanas, algunos árboles pequeños arrancados.
2	Tornado importante	113-157	Daños considerables. Arranca tejados, casas débiles destruidas, grandes árboles arrancados de raíz, objetos ligeros lanzados a gran velocidad.
3	Tornado Severo	158-206	Daños en construcciones sólidas, trenes afectados, la mayoría de los árboles son arrancados.
4	Tornado devastador	207-260	Estructuras sólidas seriamente dañadas, estructuras con cimientos débiles arrancadas y arrastradas, coches y objetos pesados arrastrados.
5	Tornado increíble	261-318	Edificios grandes seriamente afectados o derruidos, coches lanzados a distancias superiores a los 100 metros, estructuras de acero dañadas.

TABLA 1.4: CLASIFICACIÓN DE TORNADOS.

2.0 NORMATIVIDAD PARA DISEÑO POR VIENTO

2.1 Criterios de diseño

Para cualquier proyecto estructural en donde el viento sea un factor a considerar hay ciertos aspectos fundamentales que deben de considerarse, y de acuerdo a ello se utilizan diferentes criterios de diseño, en el caso de la República Mexicana, esos aspectos están establecidos dentro del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, del cual se derivan las Normas Técnicas Complementarias para diseño por viento, y así también en el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad para los distintos estados de la República Mexicana. En ellos se establece que se tiene que revisar la integridad estructural por el efecto de las fuerzas generadas por las presiones (empujes o succiones) que se producen por el viento en la superficie de una construcción expuesta al efecto del viento y que se emite al mismo sistema estructural. En esta revisión se establece que se deberán considerar aspectos como la acción estática y dinámica del viento si la estructura es vulnerable ante el efecto del viento. Así también se debe contemplar un diseño local de elementos específicos que estén directamente expuestos ante estas acciones, ya sean parte del sistema estructural o no (elementos de fachada o elementos no estructurales).

2.2 Acciones de diseño

Se considerarán tres categorías de acciones, con respecto a la duración en que interactúan con las estructuras y con su intensidad máxima.

Tipos de Acciones		
Categoría	Característica	Principales
a) Acciones permanentes	Interactúan con la estructura de forma continua y su intensidad varía poco con el paso del tiempo.	Carga muerta, empuje estático del suelo, de líquidos, deformaciones y desplazamientos impuestos a la estructura, así como los debidos a presfuerzo o a movimientos diferenciales permanentes en los apoyos.
b) Acciones variables	Se manifiestan en la estructura con una intensidad que varía de manera relevante con el tiempo.	Carga viva, efectos de temperatura, deformaciones impuestas, hundimientos diferenciales con intensidad variable con el tiempo, y las acciones causadas con el funcionamiento de maquinaria y equipo, que incluye efectos dinámicos debido a vibraciones, impacto o frenado.
c) Acciones accidentales	Estas no se deben al funcionamiento normal de una edificación y llegan a alcanzar intensidades considerables durante lapsos breves.	Acciones sísmicas, efectos del viento, cargas de granizo, efectos de explosiones, incendios y otros fenómenos que pueden presentarse en casos extraordinarios.

TABLA 2.1: TIPOS DE ACCIONES.

2.3 Clasificación de las estructuras

2.3.1 De acuerdo a su importancia

Para fines de diseño por viento y de acuerdo con la importancia para la cual serán destinadas, las estructuras se clasifican en dos grupos de acuerdo al RCDF, como se muestra en la tabla 2.2.

Grupo	Tipo de edificación	Ejemplo y especificación.
A	Edificaciones cuya falla estructural podría constituir un peligro significativo por contener sustancias tóxicas o explosivas, así como edificaciones cuyo funcionamiento es esencial a raíz de una emergencia urbana.	Hospitales, escuelas, terminales de transporte, estaciones de bomberos, centrales eléctricas y de telecomunicaciones, estadios, depósitos de sustancias inflamables o tóxicas, museos y edificios que alojen archivos y registros públicos de particular importancia, y otras edificaciones a juicio de la Secretaría de Obras y Servicios.
B	Edificaciones comunes destinadas a viviendas, oficinas y locales comerciales, hoteles y construcciones comerciales e industriales no incluidas en el Grupo A, las que se subdividen en:	a) Edificaciones de más de 30 m de altura o con más de 6,000 m ² de área total construida, ubicadas en las zonas I y II a que se aluden en el artículo 170 de este Reglamento, y construcciones de más de 15 m de altura o más de 3,000 m ² de área total construida, en zona III; en ambos casos las áreas se refieren a un solo cuerpo de edificio que cuente con medios propios de desalojo: acceso y escaleras, incluyendo las áreas de anexos, como pueden ser los propios cuerpos de escaleras. El área de un cuerpo que no cuente con medios propios de desalojo se adicionará a la de aquel otro a través del cual se desaloje.
		b) Edificios que tengan locales de reunión que puedan alojar más de 200 personas, templos, salas de espectáculos, así como anuncios autosoportados, anuncios de azotea y estaciones repetidoras de comunicación celular y/o inalámbrica.
B2	Las demás de este grupo.	

TABLA 2.2: CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS EN EL RCDF.

2.3.2 De acuerdo con su respuesta ante la acción del viento

Para fines de diseño por viento y de acuerdo a la naturaleza de los principales efectos que el viento puede ocasionar en ellas, las estructuras se clasifican en cuatro tipos, como se describe en la tabla 2.3.

Clasificación de las estructuras de acuerdo a su respuesta al viento	
Tipo	Característica
a)1	Comprende las estructuras poco sensibles a las ráfagas y a los efectos dinámicos de viento. Incluye las construcciones cerradas techadas con sistemas de cubierta rígidos; es decir, que sean capaces de resistir las cargas debidas a viento sin que varíe esencialmente su geometría. Se excluyen las construcciones en que la relación entre altura y dimensión menor en planta es mayor que 5 o cuyo periodo natural de vibración excede de 1 segundo. Se excluyen también las cubiertas flexibles, como las de tipo colgante, a menos que por la adopción de una geometría adecuada, la aplicación de presfuerzo u otra medida, se logre limitar la respuesta estructural dinámica.
b)2	Comprende las estructuras cuya esbeltez o dimensiones reducidas de su sección transversal las hace especialmente sensibles a las ráfagas de corta duración, y cuyos periodos naturales largos favorecen la ocurrencia de oscilaciones importantes. Se cuentan en este tipo, los edificios con esbeltez, definida como la relación entre la altura y la mínima dimensión en planta, mayor que 5, o con periodo fundamental mayor que 1 segundo. Se incluyen también las torres atirantadas o en voladizo para líneas de transmisión, antenas, tanques elevados, parapetos, anuncios, y en general las estructuras que presentan dimensión muy corta paralela a la dirección del viento. Se excluyen las estructuras que explícitamente se mencionan como pertenecientes a los Tipos 3 y 4.
c)3	Comprende estructuras como las definidas en el Tipo 2 en que, además, la forma de la sección transversal propicia la generación periódica de vórtices o remolinos de ejes paralelos a la mayor dimensión de la estructura. Son de este tipo las estructuras o componentes aproximadamente cilíndricos, tales como tuberías, chimeneas y edificios con planta circular.
d)4	Comprende las estructuras que por su forma o por lo largo de sus periodos de vibración presentan problemas aerodinámicos especiales. Entre ellas se hallan las cubiertas colgantes, que no pueden incluirse en el Tipo 1.

TABLA 2.3: CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE ACUERDO A SU RESPUESTA AL VIENTO.

2.4 Efectos a considerar

Para el criterio de diseño de estructuras sometidas a la acción de viento se toman en cuenta aquellos de los efectos siguientes que puedan ser importantes en cada caso:

- a) Empujes y succiones estáticos
- b) Fuerzas dinámicas paralelas y transversales al flujo principal, causadas por turbulencia.
- c) Vibraciones transversales al flujo causadas por vórtices alternantes; y
- d) Inestabilidad aeroelástica.

2.5 Estudio en túnel de viento

Cuando existe el caso de que una estructura tenga una geometría irregular y sus propiedades la hagan más sensible al efecto del viento, el análisis y cálculo de dichos efectos se deberán basar en estudios de túnel de viento, así también podrán basarse en resultados de análisis de construcciones semejantes. Los procedimientos de ensayos y análisis e interpretación de los resultados de estudios de túnel de viento deben seguir técnicas reconocidas y deberán ser aprobados por la administración.

2.6 Método Estático para diseño por viento

Para el cálculo de empujes y/o succiones sobre las construcciones del Tipo 1 debidas a la presión del viento, se podrá emplear el método estático al aplicar la presión de diseño (p_z) correspondiente y los coeficientes de presión para el tipo de estructura analizada.

El método estático únicamente puede utilizarse para diseñar estructuras o elementos estructurales que sean poco sensibles a la acción turbulenta del viento (ráfagas). Esta condición se satisface cuando:

- a) La relación $H / d \leq 5$
- b) El periodo fundamental de la estructura es menor o igual que cinco segundos.

2.6.1 Determinación de la velocidad de diseño.

Los efectos estáticos de la acción del viento sobre una estructura o algún elemento estructural se determinan con base en la velocidad de diseño. La velocidad de diseño se obtiene de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$VD = FTR F_{\alpha} VR \quad (1)$$

en donde:

FTR es un factor correctivo considerando las condiciones locales de topografía y rugosidad del terreno a las zonas aledañas al sitio de desplante.

F_{α} es un factor que considera la variación de la velocidad con la altura.

VR es la velocidad regional de acuerdo a la zona correspondiente al sitio de construcción.

La velocidad regional se determina de acuerdo con la tabla 2.4

		Clasificación de la estructura		
		A	B	Temporal
Delegaciones		m/s		
Zona I	Álvaro Obregón, Azcapotzalco, Benito Juárez, Coyoacán, Cuauhtémoc, G.A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza	39	36	31
Zona II	Magdalena Contreras, Cuajimalpa, Milpa Alta, Tlalpan y Xochimilco	35	32	28

TABLA 2.4: VELOCIDADES REGIONALES, V_R , SEGÚN LA IMPORTANCIA DE LA CONSTRUCCIÓN Y LA ZONIFICACIÓN EÓLICA, M/S

2.6.2 Tipos de Terreno

El tipo de terreno se selecciona de acuerdo con la tabla 2.5.

Tipo	Descripción	α	δ
			m
R1	Escasas o nulas obstrucciones al flujo del viento, como campo abierto.	0.099	245
R2	Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones.	0.128	315
R3	Zona típica urbana y suburbana. El sitio está rodeado predominantemente por construcciones de mediana y baja altura o por áreas arboladas y no se cumplen las condiciones del tipo R4	0.156	390
R4	Zona de gran densidad por edificios altos. Por lo menos la mitad de las edificaciones que se encuentran en un radio de 500 m alrededor de la estructura en estudio tiene altura superior a 20 m	0.17	455

TABLA 2.5: COEFICIENTES α Y Δ EN FUNCIÓN DE LA RUGOSIDAD DEL TERRENO.

El tipo de terreno depende de la rugosidad de éste, como se muestra en la ilustración 2.1.

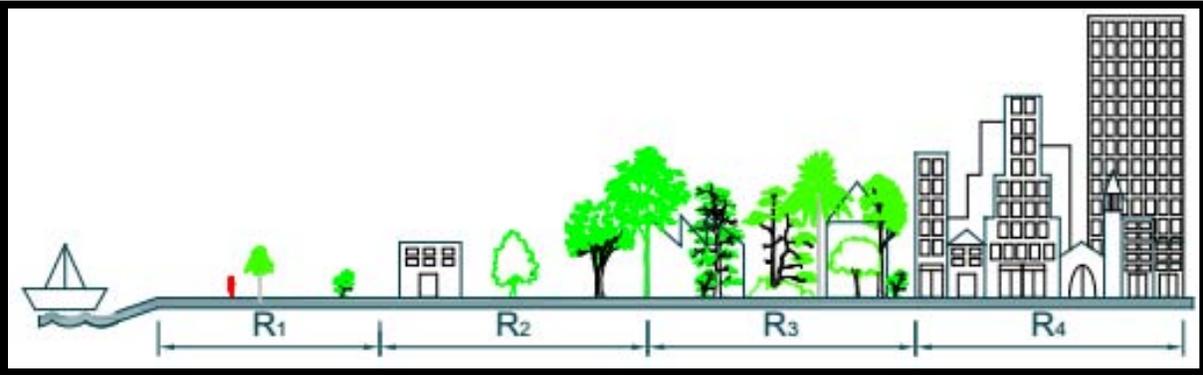


ILUSTRACIÓN 2.1: TIPOS DE TERRENO (INIFED-2011)

2.6.3 Factor de variación con la altura

El factor F_α que define la variación de la velocidad con la altura (z) y se determina con las expresiones siguientes:

$$F_\alpha = 1.0 ; \text{si } z \leq 10 \text{ m} \quad (1a)$$

$$F_\alpha = \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha ; \text{si } 10 \text{ m} < z < \delta \quad (1b)$$

$$F_\alpha = \left(\frac{\delta}{10}\right)^\alpha ; \text{si } z \geq \delta \quad (1c)$$

en donde:

δ altura gradiente, que se mide a partir del nivel del terreno de desplante, por encima de la cual la variación de la velocidad del viento no es importante y se puede suponer constante.

α exponente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura.

δ y z están dadas en metros.

2.6.4 Factor correctivo por topografía y rugosidad FTR

Este factor toma en cuenta el efecto topográfico local del sitio en donde se desplante la estructura y a su vez la variación de la rugosidad de los alrededores del sitio. En este último caso, si en una dirección de análisis de los efectos del viento existen diferentes rugosidades con longitud menor de 500 m, se deberá considerar la que produzca los efectos más desfavorables. La tabla 2.6 presenta una clasificación del tipo de topografía para los análisis.

*En terreno tipo R1, el factor de topografía y rugosidad FTR, se tomará igual a 1.0 en todos los casos.

Tipo de topografía	Descripción	Rugosidad de terrenos aledaños		
		R2	R3	R4
T1	Base protegida de promontorios y faldas de serranías del lado de sotavento	0.8	0.7	0.66
T2	Valles cerrados	0.9	0.79	0.74
T3	Terreno prácticamente plano, campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menos de 5% (normal)	1	0.88	0.82
T4	Terrenos inclinados con pendientes entre 5 y 10 %	1.1	0.97	0.9
T5	Cimas de promontorios colinas o montañas, terrenos con pendientes mayores de 10 %, cañadas o valles cerrados	1.2	1.06	0.98

TABLA 2.6: FACTOR DE TOPOGRAFÍA Y RUGOSIDAD DEL TERRENO.

La ilustración 2.2 muestra esquemáticamente diferentes tipos de topografía.

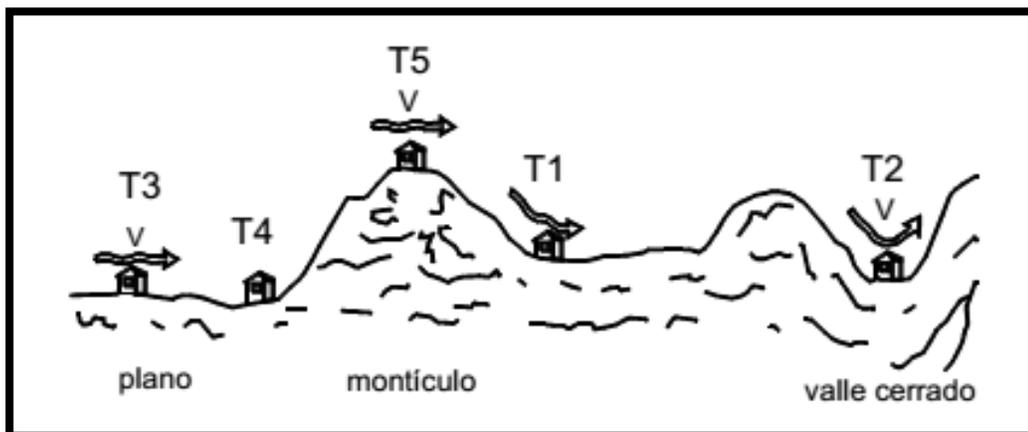


ILUSTRACIÓN 2.2: TIPOS DE TOPOGRAFÍA (NTC-DV-2004)

2.6.5 Determinación de la presión de diseño

La presión producida por el flujo del viento sobre una construcción (p_z), se determina tomando en cuenta su forma y se obtiene de manera general con la siguiente expresión:

$$p_z = 0.048 C_p V D^2 \quad \text{Pa (kg/m}^2\text{)} \quad (2)$$

donde:

C_p es el coeficiente local de presión, que depende de la geometría de la estructura.

VD es la velocidad de diseño a la altura z .

2.6.6 Factores de presión

Los factores de presión C_p , para el caso del método estático, se determinan según el tipo y forma de la construcción. Para este estudio sólo se determinarán las condiciones del Caso I Edificios y construcciones cerradas. La tabla 2.7 muestra los coeficientes de presión para las diferentes zonas de una estructura cerrada.

Coeficiente para construcciones cerradas	
Tipo	C_p
Pared barlovento	0.8
Pared de sotavento	-0.4
Paredes laterales	-0.8
Techos Planos	-0.8
Techos inclinados lado de sotavento	-0.7
Techos inclinados lado de barlovento	$-0.8 < 0.04 \Theta - 1.6 < 1.8$
Techos curvos	Tabla y fig.

*El ángulo Θ define la inclinación del techo

TABLA 2.7: COEFICIENTES C_p PARA EDIFICIOS Y CONSTRUCCIONES CERRADAS

2.7 Desplazamientos permisibles

Derivado del cálculo y análisis se verificará que los desplazamientos relativos entre niveles consecutivos de los edificios en estudio, causados por las fuerzas de diseño por los efectos del viento, se verificará que no rebasen de los siguientes valores:

- a) Cuando no existan elementos de relleno que puedan dañarse como consecuencia de las deformaciones angulares: 0.005
- b) Cuando existan elementos de relleno que puedan dañarse como consecuencia de las deformaciones angulares: 0.002

3.0 RESPUESTA DE LAS ESTRUCTURAS AL EFECTO DEL VIENTO

3.1 Sistema lineal de un grado de libertad

Una estructura puede responder a los efectos del viento por medio de las masas de aire que se desplazan con cierta velocidad e interactúan con ella. Para caracterizar el sistema estructural, éste se puede modelar como un sistema de un grado de libertad, como se muestra en la ilustración 3.1.

Para realizar la caracterización del sistema, éste se constituirá por una masa, un resorte y un amortiguador. Cuando la estructura es sometida a velocidades del viento turbulento, la masa empezará a oscilar y se producirán en ella tres tipos de fuerzas.

1. **Inercia**, que definida por el principio de D' Alambert siempre es proporcional a la masa y a la aceleración (\ddot{u}).

$$F_I = m\ddot{u} \quad (3)$$

2. **Fuerza generada por la rigidez**, que se produce en la columna ocasionada por la rigidez lateral al momento intentar desplazarse con respecto al terreno. Con la premisa de que la columna se mantendrá dentro de un intervalo lineal, la fuerza deberá ser equivalente al producto del desplazamiento relativo de la masa con respecto a su base por la rigidez (k).

$$F_R = ku \quad (4)$$

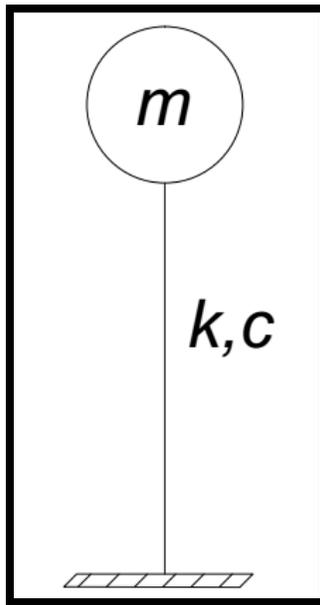


ILUSTRACIÓN 3.1: MODELO DE UN SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD

3. **Fuerza de amortiguamiento**, ésta intenta restituir el equilibrio de la estructura que comienza a vibrar. A la fuerza de amortiguamiento se le considera proporcional a la velocidad de la masa con respecto al suelo. Al factor de proporcionalidad (c) se le conoce como coeficiente de amortiguamiento.

$$F_A = c\dot{u} \quad (5)$$

Es de aquí que nace la ecuación dinámica de movimiento:

$$F_I + F_A + F_R = P(t) \quad (6)$$

donde $P(t)$ es la fuerza del viento

Sustituyendo las tres fuerzas, inercia, amortiguamiento y rigidez:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = P(t) \quad (7)$$

y finalmente dividiendo entre la masa

$$\ddot{u} + \frac{c}{m}\dot{u} + \frac{k}{m}u = P_0 \quad (8)$$

de donde podemos mencionar que $\frac{c}{m}$ y $\frac{k}{m}$ son constantes vinculadas con la vibración del sistema. De aquí:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (9)$$

ω representa a la frecuencia circular del sistema no amortiguado, es decir, cuando se aplica un desplazamiento, se suelta y comienza la oscilación. Cuando el amortiguamiento es igual a cero, el sistema se comporta como un movimiento armónico simple, con un periodo que se obtiene con la siguiente ecuación:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (10)$$

El amortiguamiento que tiene la estructura es significado de la disipación de la energía que ésta realiza primordialmente por la fricción interna de los materiales y el roce de los

componentes de la estructura, mismo que a su vez, con transcurso del tiempo, aminora las oscilaciones.

En un fenómeno de vibración libre, el amortiguamiento crítico se define como aquel para el cual el sistema restituye a su posición inicial en reposo. Lo cual se puede calcular como:

$$C_{Cr} = 2\sqrt{km} \quad (11)$$

Por lo tanto, la constante de amortiguamiento puede expresarse como una fracción del crítico en la forma:

$$\xi = \frac{c}{C_{Cr}} = \frac{c}{2\omega m} \quad (12)$$

La ilustración 3.2 muestra un ejemplo de movimiento armónico simple, en donde se identifican la amplitud y el periodo del movimiento.

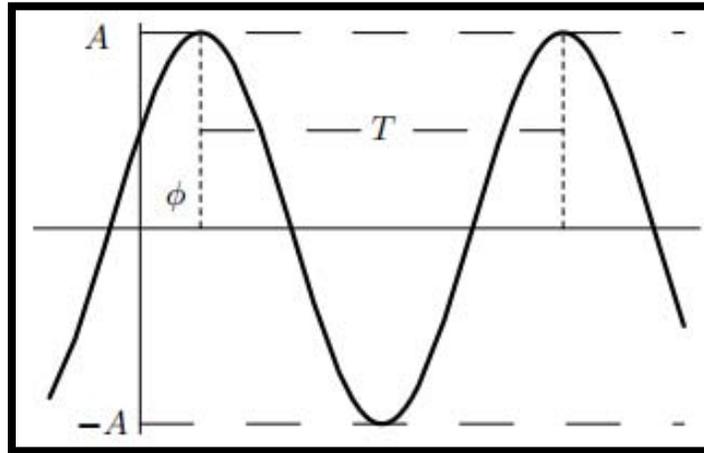


ILUSTRACIÓN 3.2: MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE (UNIVALLE 2006)

3.2 Dinámica de Osciladores

3.2.1 Sistemas Dinámicos

Un sistema dinámico es un concepto matemático que representa el comportamiento comúnmente físico mediante un sistema de ecuaciones, del cual se pueden obtener características de puntos singulares del mismo, este comportamiento se debe a la interacción de elementos, en donde las ecuaciones dependen del tiempo (t). Si t pertenece a los números reales se denomina al sistema como continuo, en cambio si t pertenece al conjunto de números enteros, entonces el sistema es discreto. En cuanto al flujo del tiempo, siempre será

positivo, pero el estado del sistema depende del estado inmediato anterior, definiendo así su comportamiento. El comportamiento de la dinámica en los sistemas oscilatorios se define como una tipificación con características singulares, dependiendo del sistema que se emplee en el análisis, pero igualmente guardan una respuesta común entre ellos.

3.2.2 Sistemas Oscilatorios

Los sistemas oscilatorios se definen como un sistema dinámico, el movimiento de un cuerpo o una masa se puede intuir si se conocen las condiciones iniciales del movimiento y las fuerzas externas que propician el movimiento de la masa o el cuerpo. Se dice que, si una fuerza cambia en el tiempo, por consecuencia la velocidad y la aceleración también cambiarán. Normalmente el movimiento que producen los sistemas oscilatorios son movimientos periódicos, con un comportamiento que define una ecuación diferencial de orden n , en donde la solución es de la siguiente forma:

$$x = [C_1 V_1 C_2 V_2] e^{\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} t} \quad (13)$$

Así también los osciladores se pueden clasificar como osciladores periódicos y no periódicos, donde es común que los osciladores no periódicos provengan de osciladores denominados no lineales, en los cuales no abundaremos ya que no es fin de esta investigación (el sistema sometido a viento se mantendrá elástico).

3.2.3 Osciladores lineales

Los osciladores lineales se pueden identificar por la proporcionalidad que guardan la fuerza de restauración que trata de reponer el equilibrio del sistema y magnitud de la fuerza de excitación que perturba al cuerpo o masa. Describen un comportamiento dado por una ecuación diferencial lineal de segundo orden, el valor de las variables a , b , c y $g(t)$ se clasifican por el comportamiento que describen. Los osciladores lineales también se les denomina como osciladores armónicos, debido a que su solución se puede expresar como funciones senoidales, lo cual se traduce a que los osciladores armónicos siempre serán periódicos.

3.2.4 Oscilador Armónico Simple

El caso del oscilador armónico simple es el caso más básico ya que únicamente se toma en cuenta la fuerza que trata de restituir el equilibrio, es decir, sin amortiguamiento. Las condiciones para que se dé el oscilador armónico simple son:

$$a > 0, b = 0, c > 0 \text{ y } g(t) = 0$$

es decir:
$$a\ddot{x} + cx = 0 \tag{14}$$

El comportamiento de esta ecuación diferencial se refiere a una oscilación sin amortiguamiento, lo que se traduce a que la energía no es disipada, sino que esta se transforma, esto es un caso no real, ya que en la realidad todos los osciladores presentan pérdida de energía y por ende se produce amortiguamiento.

Para la solución de la ecuación diferencial se tiene que hacer las siguientes consideraciones:

$$x(0) = A$$

$$y$$

$$c/a = \omega^2$$

entonces:

$$x(t) = A \cos \omega t \tag{15}$$

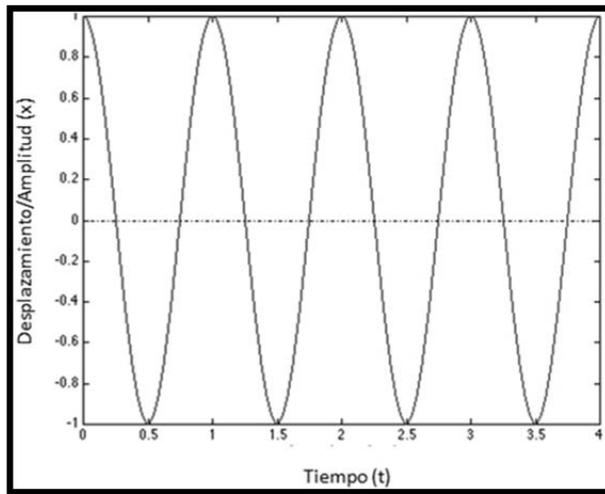


ILUSTRACIÓN 3.3: OSCILADOR ARMÓNICO SIMPLE (MATLAB 2011)

3.2.5 Oscilador Armónico Amortiguado

El oscilador armónico amortiguado es el caso más aproximado a la realidad, en donde se tiene en cuenta el rozamiento del aire, que funge como amortiguador, el rozamiento se toma proporcional a la velocidad. Este es el caso generalizado de los osciladores armónicos libres ya que su comportamiento contempla pérdida de energía, pero no intervienen fuerzas externas. El comportamiento de un oscilador armónico amortiguado está dado por la siguiente ecuación diferencial:

$$a\ddot{x} + 2\alpha\dot{x} + \omega^2x = 0 \quad (16)$$

en donde las condiciones iniciales deben ser:

$$a > 0, b \neq 0, c > 0 \text{ y } g(t) = 0$$

y para la solución se tiene que considerar:

$$b/a = 2\alpha \text{ y } c/a = \omega^2$$

entonces:

$$\ddot{x} + 2\alpha\dot{x} + \omega^2x = 0 \quad (17)$$

$$\text{Si } x(0) = A$$

La solución final a la ecuación diferencial es:

$$w' = \sqrt{(\omega^2) - (\alpha^2)}$$

$$x(t) = Ae^{-\alpha t} \cos \omega' t \quad (18)$$

El sistema reacciona con una señal cosenoidal, pero el comportamiento del sistema varía en forma significativa de acuerdo al signo del discriminante.

$$\Delta = 4\alpha^2 - \omega^2$$

De esto se deducen tres comportamientos:

Oscilación amortiguada ($\Delta < 0$): la ecuación característica tiene dos raíces complejas conjugadas λ y λ^* .

Sistema críticamente amortiguado ($\Delta = 0$): la ecuación característica tiene raíces reales repetidas $\lambda_1 = \lambda_2 = -\alpha$.

Sistema sobreamortiguado ($\Delta > 0$): En este caso se tienen dos raíces reales negativas distintas λ_1, λ_2 .

Las ilustraciones 3.4 a 3.6 ilustran los casos de amortiguamiento mencionados.

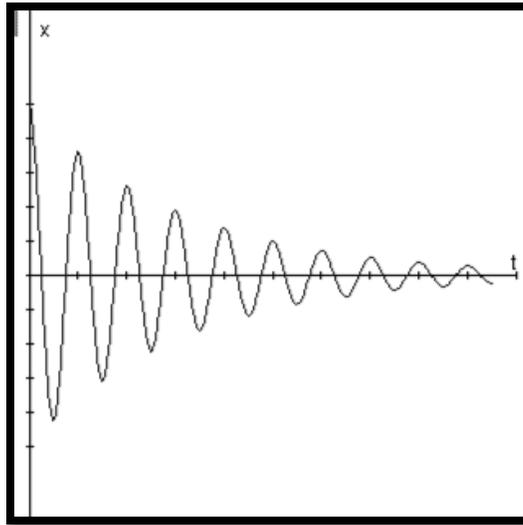


ILUSTRACIÓN 3.4: OSCILACIÓN ARMÓNICA AMORTIGUADA (MATLAB 2011)

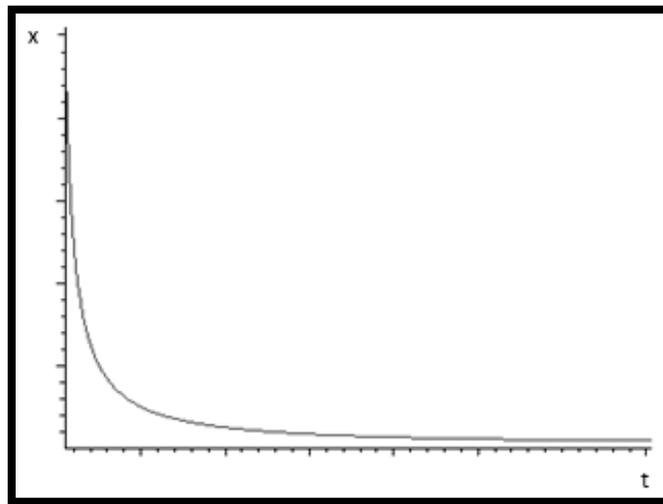


ILUSTRACIÓN 3.5: SISTEMA CRÍTICAMENTE AMORTIGUADO (MATLAB 2011)

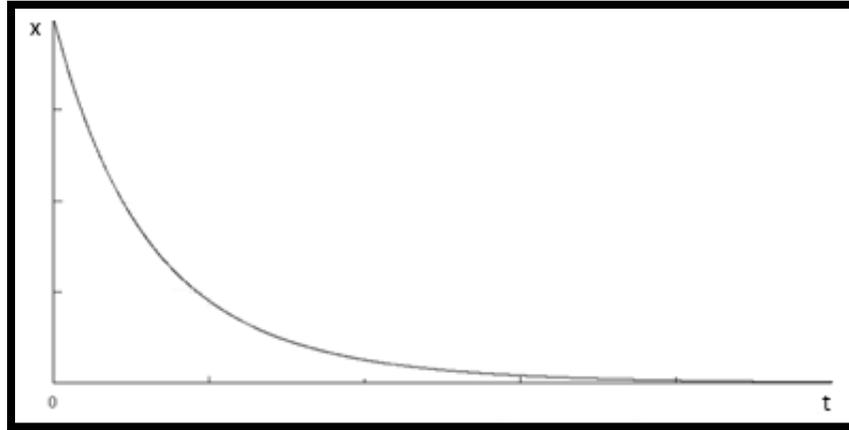


ILUSTRACIÓN 3.6: SISTEMA SOBREAMORTIGUADO (MATLAB 2011)

3.2.6 Oscilador Armónico Forzado

Hasta ahora se ha discutido acerca de los sistemas que disipan energía o amortiguados, la oscilación pierde energía y la masa o cuerpo recupera el equilibrio.

El movimiento del Oscilador Armónico Forzado entra en el supuesto de que fuerzas externas excitan a la masa o cuerpo y afectan al sistema de tal modo que entra en oscilación. Para mantener ese estado de oscilación, la fuerza externa se tiene que mantener activa para compensar la disipación de la energía del amortiguamiento.

El oscilador armónico forzado representa la generalización de osciladores armónicos, y el comportamiento está dado por la siguiente ecuación diferencial:

$$a\ddot{x} + b\dot{x} + cx = g(t) \quad (19)$$

con las siguientes condiciones iniciales

$$a > 0, b \neq 0, c > 0$$

y

$$g(t) = F \cos \omega t \quad (20)$$

En el caso de nuestro estudio la ecuación anterior depende del tiempo, es no homogénea, la ecuación expresará el comportamiento de un oscilador armónico amortiguado, en nuestro análisis se puede ejemplificar cuando la fuerza del viento llega y excita a la masa rígida del edificio, el edificio empieza a oscilar a una frecuencia ω , cuando la fuerza del viento deja de estar activa sobre el edificio, éste se comporta como un oscilador amortiguado.

Las características del comportamiento de oscilación están dadas por la siguiente ecuación diferencial:

$$\ddot{x} + 2\alpha\dot{x} + w^2x = F\cos \omega e^t \quad (21)$$

Y con la siguiente solución:

$$x(t) = \frac{F}{G} \text{sen} (\omega e^t - \delta)$$

$$G = \sqrt{(\omega e^t - \omega^2) + (2\alpha\omega e)^2}$$

$$\delta = \text{angcos} \left(\frac{2\alpha\omega e}{G} \right)$$

La ilustración 3.7 presenta la respuesta de un oscilador armónico forzado.

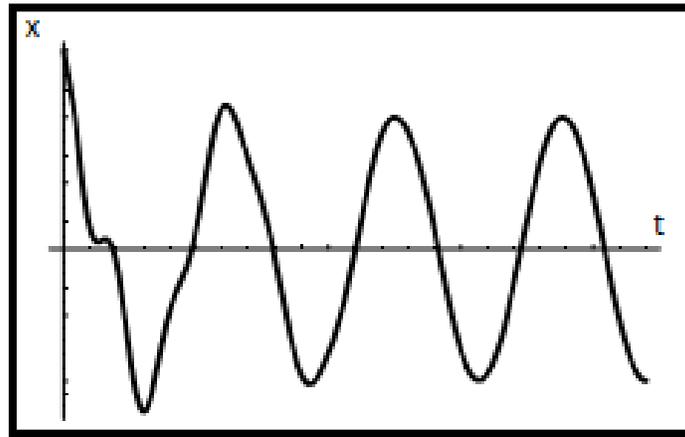


ILUSTRACIÓN 3.7: CURVAS DE UN OSCILADOR ARMÓNICO FORZADO (UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS 2002)

En el estudio de las estructuras sometidas a los efectos del viento turbulento, la estructura se puede modelar como un sistema de un grado de libertad, cuya modelación analítica se realiza con la ecuación de un oscilador armónico con amortiguamiento forzado. En la implementación de las NTCDV (2004) se emplea el Factor de Respuesta de Ráfaga para determinar la respuesta máxima esperada del sistema estudiado ante los efectos del viento.

3.3 Factor de Respuesta de Ráfaga

El Factor de Respuesta de Ráfaga (G), también conocido como Factor de Amplificación Dinámica (FAD) fue propuesto en 1961 por el Dr. Alan G. Davenport, este factor es adoptado para las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y el Manual de Diseño de Obras Civiles.

De acuerdo al Reglamento de Construcciones del Distrito Federal se especifica que para construcciones cuyas características concuerden al Tipo 2, las acciones estáticas y dinámicas provocadas por la turbulencia se obtendrán multiplicando la presión de diseño (pz) por un factor de amplificación dinámica (FAD) determinado con la expresión:

$$G = 0.43 + g \sqrt{\frac{R}{C_e} \left(B + \frac{SF}{\beta} \right)} \geq 1 \quad (22)$$

donde R es un coeficiente de exposición y Ce un factor correctivo, depende de la altura z que está en metros y se define como:

$$C_e = (z/a)^n \quad (23)$$

g es el factor de respuesta máxima y se calcula con la siguiente ecuación simplificada:

$$g = \left(\sqrt{2 \ln(3600v)} + \frac{0.58}{\sqrt{2 \ln(3600v)}} \right) \frac{1}{2.3} \geq 1.48 \quad (24)$$

Donde

$$v = n_0 \sqrt{\frac{SF}{SF + \beta B}} \quad (25)$$

B es el factor de excitación de fondo y se calcula con la siguiente ecuación simplificada:

$$B = \frac{4}{3} \int_0^{914/H} \left(\frac{1}{1 + \frac{xH}{457}} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{xH}{122}} \right) \left(\frac{x}{(1+x^2)^{4/3}} \right) dx \quad (26)$$

S es el factor reductivo por tamaño y se calcula con la siguiente ecuación simplificada:

$$S = \frac{\pi}{3} \left(\frac{1}{1 + \frac{8n_0H}{3V_H}} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{10n_0b}{V_H}} \right) \quad (27)$$

F es la relación de energía en ráfaga y se calcula con la siguiente ecuación simplificada:

$$F = \frac{x_0^2}{(1+x_0^2)^{4/3}} \quad (28)$$

en donde:

$$x_0 = \left(\frac{1220n_0}{V_H} \right) \quad (29)$$

R es el factor de rugosidad

n_0 es la frecuencia del modo fundamental de la estructura calculada en Hz

H es la altura de la estructura en m

b es la fracción del amortiguamiento crítico (0.01 en estructuras de acero, 0.02 en estructuras de concreto).

Los valores de los parámetros anteriores varían de acuerdo a las condiciones de exposición que se muestran en la tabla 3.1.

Parámetros R, a y n			
Exposición	R	a	n
R1	0.04	10	0.18
R2	0.08	10	0.28
R3	0.16	20	0.5
R4	0.34	33	0.72

TABLA 3.1: PARÁMETROS SEGÚN LA CONDICIÓN DE EXPOSICIÓN

La metodología del Factor de Respuesta de Ráfaga se fundamenta primordialmente en la Teoría Estadística Espectral que se resume en la ilustración 3.8.

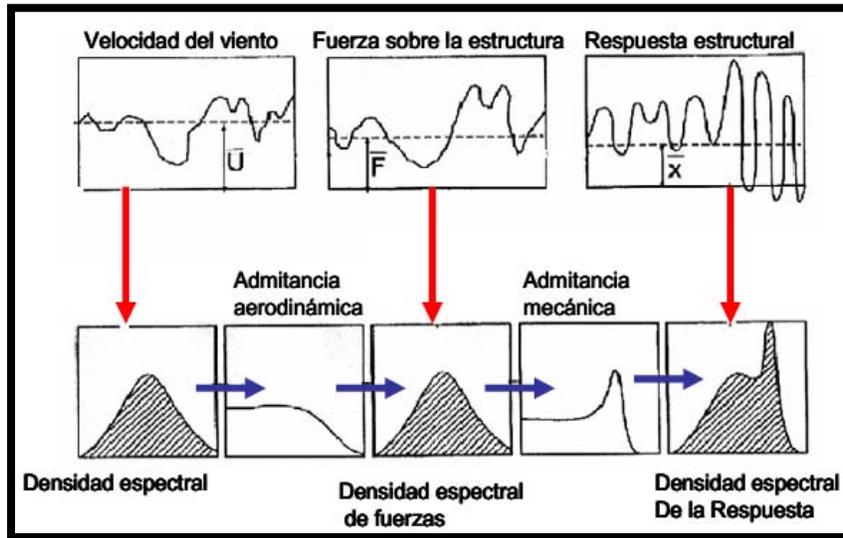


ILUSTRACIÓN 3.8: ESQUEMA DE SOLUCIÓN DE LA TEORÍA ESTADÍSTICA ESPECTRAL (SOCIEDAD MEXICANA DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL 2004)

3.4 Solución numérica de la ecuación de movimiento dinámico

3.4.1 Método de Newmark para sistemas lineales.

Además del empleo del Factor de Respuesta de Ráfaga, se puede emplear el método de Newmark para integrar numéricamente la ecuación de movimiento y determinar la respuesta de la estructura sometida a fuerzas de viento. A continuación, se presenta el algoritmo empleado y programado en MATLAB.

Caso 1: Método promedio de aceleración $\gamma = \frac{1}{2}; \beta = \frac{1}{4}$

Caso 2: Método de aceleración lineal $\gamma = \frac{1}{2}; \beta = \frac{1}{6}$

Para nuestro estudio utilizaremos el caso 1: Método promedio de aceleración

Cálculos iniciales:

i. $\ddot{u}_0 = \frac{p_0 - c\dot{u}_0 - k_{u0}}{m}$

ii. *Seleccionar un Δt*

$$\text{iii. } \hat{k} = k + \frac{\gamma}{\beta \Delta_t} + \frac{1}{\beta (\Delta_t)^2} m$$

$$\text{iv. } a = \frac{1}{\beta \Delta_t} m + \frac{\gamma}{\beta} c$$

$$b = \frac{1}{2\beta} + \Delta_t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) c$$

Cálculos para cada tiempo i:

$$\text{i. } \Delta \hat{p}_i = \Delta p_i + a \dot{u}_i + b \ddot{u}_i$$

$$\text{ii. } \Delta u_i = \frac{\Delta \hat{p}_i}{\hat{k}}$$

$$\text{iii. } \Delta \dot{u}_i = \frac{1}{\beta (\Delta_t)^2} u_i - \frac{1}{\beta \Delta_t} \dot{u}_i - \frac{1}{2\beta} \ddot{u}_i$$

$$\text{iv. } u_{i+1} = u_i + \Delta u_i$$

$$\text{v. } \dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + \Delta \dot{u}_i$$

$$\text{vi. } \ddot{u}_{i+1} = \ddot{u}_{i+1} + \Delta \ddot{u}_i$$

Se repite para cada tiempo i:

El método de Newmark es estable si se cumple que:

$$\frac{\Delta_t}{T_n} \leq \frac{1}{\pi \sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{\gamma - 2\beta}}$$

Y para el caso 1, con $\gamma=1/2$ y $\beta=1/4$ se convierte en:

$$\frac{\Delta_t}{T_n} < \infty$$

Esto implica que el método es estable para cualquier incremento de tiempo, sin importar qué tan largo sea; sin embargo, es preciso cuando el incremento de tiempo es pequeño.

Para el caso 2, con $\gamma=1/2$ y $\beta=1/6$ se deduce que es estable si se cumple que:

$$\frac{\Delta_t}{T_n} < 0.55$$

*4.0 MODELACIÓN
ANALÍTICA Y
MATEMÁTICA DE
OSCILADORES
SOMETIDOS A VIENTO*

4.1 Modelos de base de datos

Mediante una base de datos de edificios obtenida de una tesis de doctorado de Hogan M. de la Universidad de Western Ontario Canadá y proporcionada por el Dr. Adrián Pozos Estrada, se seleccionaron 10 edificios para la modelación analítica y matemática.

Esta base de datos contiene características como la geometría de las plantas de los edificios, la altura, la torsión y el periodo en ambas direcciones. Con base en esta base de datos se realizó una selección de edificios de acuerdo a su periodo y relación de aspecto.

En la base de datos se seleccionaron edificios que cumplieran las condiciones establecidas en las Normas Técnicas Complementarias, para utilizar el método dinámico. Primero descartamos todos los edificios que tuvieran un periodo menor o igual a 0.5 segundos en ambas direcciones, después por relación de aspecto, descartamos todos los que fueran menores a 5, y de esa selección se obtuvieron 12 resultados, como se muestran en la tabla 4.1.

No.	Edificio	w		b		H		T		Frecuencia		f _w ≥ 0.1	
		ft	m	ft	m	ft	m	w (s)	b (s)	w(Hz)	b(Hz)	w	b
1	1	197	60.05	425	129.54	1250	381	8.3	8.3	0.12	0.12	0.120	0.120
2	8	112	34.14	168	51.21	430	131.06	4.47	3.94	0.224	0.254	0.224	0.254
3	83	229	69.80	133	40.54	150	45.72	1.42	1.41	0.704	0.709	0.704	0.709
4	93	156	47.55	145	44.20	150	45.72	1.31	1.31	0.763	0.763	0.763	0.763
5	94	207	63.09	162	49.38	150	45.72	1.27	1.15	0.787	0.87	0.787	0.870
6	96	236	71.92	160	48.77	150	45.72	1.85	1.3	0.541	0.769	0.541	0.769
7	117	168	51.21	160	48.77	150	45.72	1.6	1.33	0.625	0.752	0.625	0.752
8	121	-	-	180	54.86	240	73.15	1.35	1.35	0.741	0.741	0.741	0.741
9	129	295	89.92	251	76.50	338	103.02	1.95	1.5	0.513	0.667	0.513	0.667
10	135	240	73.15	238	72.54	174	53.04	0.91	0.98	1.099	1.02	1.099	1.020
11	151	275	83.82	186	56.69	150	45.72	1.49	1.66	0.671	0.602	0.671	0.602
12	153	162	49.38	115	35.05	150	45.72	1.8	1.86	0.556	0.538	0.556	0.538

TABLA 4.1: SELECCIÓN DE BASE DE DATOS.

Por último, de los 12 resultados compatibles, descartamos aquellos edificios con frecuencia mayor o igual a 1 Hz y de ello obtuvimos 11 resultados, para finalmente descartar uno por similitud en sus características con otro edificio. La selección final se muestra en la tabla 4.2.

No.	Edificio	w		b		H		T		Frecuencia		f _w ≥ 0.1	
		ft	m	ft	m	ft	m	w (s)	b (s)	w(Hz)	b(Hz)	w	b
1	1	197	60.05	425	129.54	1250	381	8.3	8.3	0.120	0.120	0.120	0.120
2	8	112	34.14	168	51.21	430	131.06	4.47	3.94	0.224	0.254	0.224	0.254
3	83	229	69.80	133	40.54	150	45.72	1.42	1.41	0.704	0.709	0.704	0.709
4	93	156	47.55	145	44.20	150	45.72	1.31	1.31	0.763	0.763	0.763	0.763
5	94	207	63.09	162	49.38	150	45.72	1.27	1.15	0.787	0.870	0.787	0.870
6	96	236	71.92	160	48.77	150	45.72	1.85	1.3	0.541	0.769	0.541	0.769
7	117	168	51.21	160	48.77	150	45.72	1.6	1.33	0.625	0.752	0.625	0.752
8	129	295	89.92	251	76.50	338	103.02	1.95	1.5	0.513	0.667	0.513	0.667
9	135	240	73.15	238	72.54	174	53.04	0.91	0.98	1.099	1.020	1.099	1.020
10	151	275	83.82	186	56.69	150	45.72	1.49	1.66	0.671	0.602	0.671	0.602

TABLA 4.2: EDIFICIOS SELECCIONADOS PARA LA MODELACIÓN.

Las ilustraciones 4.1 a 4.3 muestran vistas de los edificios seleccionados para los análisis.

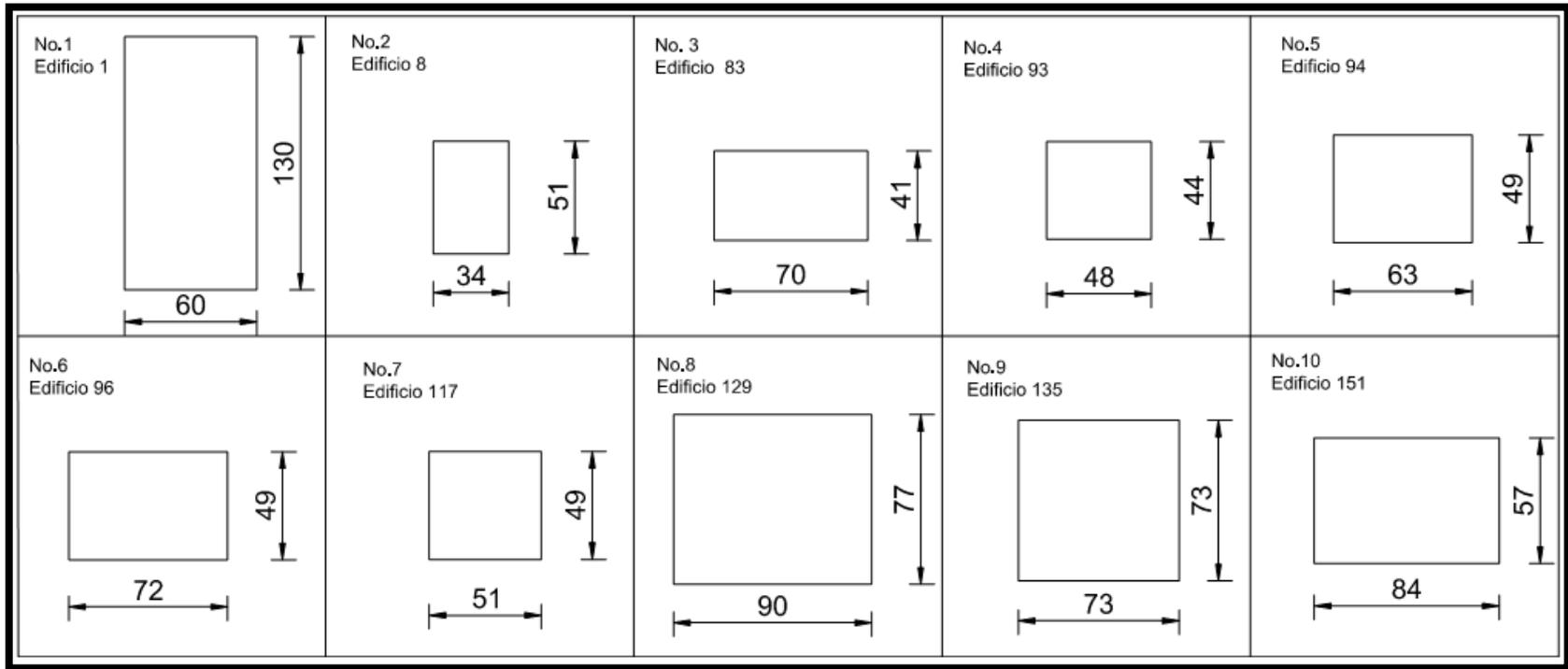


ILUSTRACIÓN 4.1: PLANTAS DE MODELOS DE EDIFICIOS

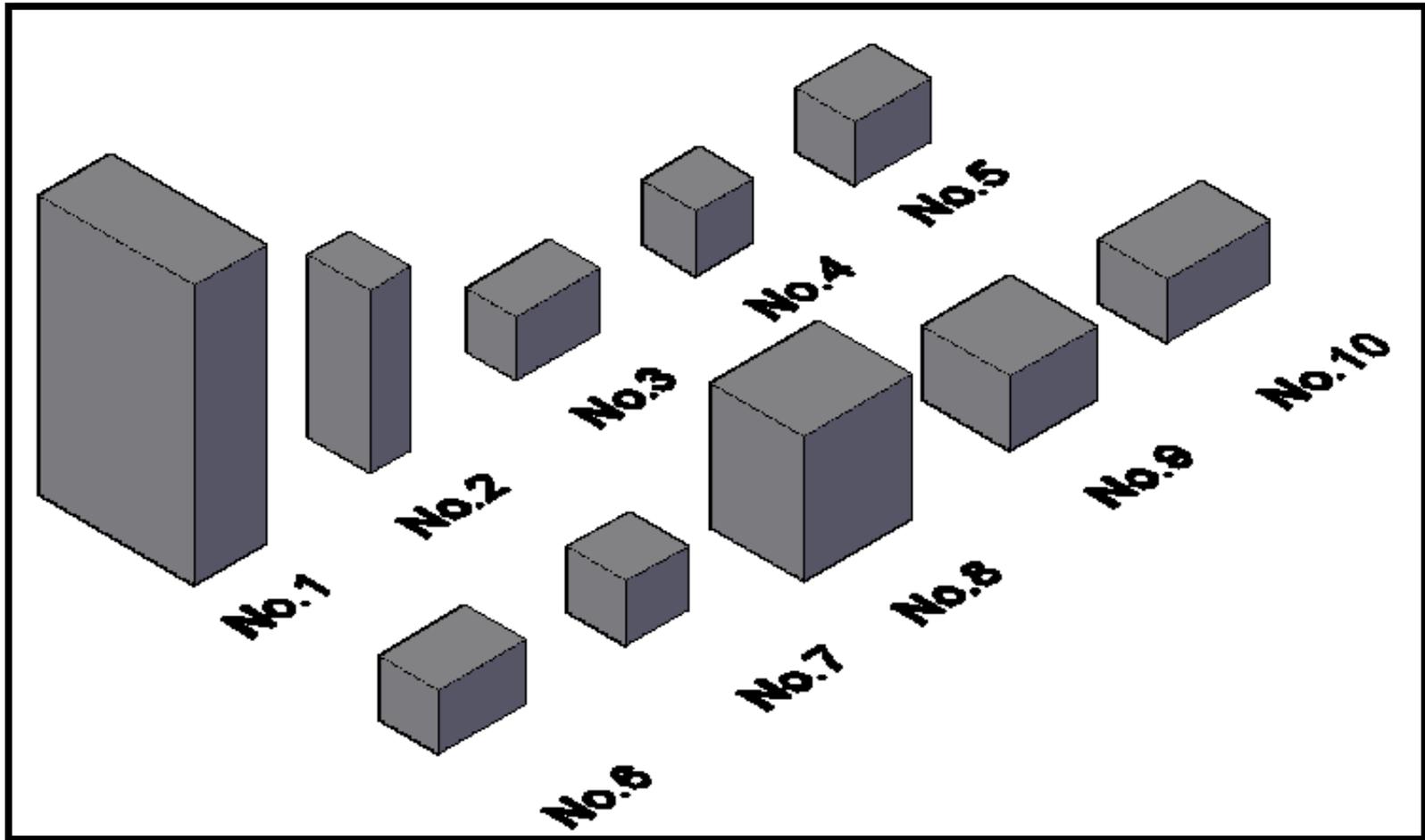


ILUSTRACIÓN 4.2: ISOMÉTRICO DE MODELOS DE EDIFICIOS

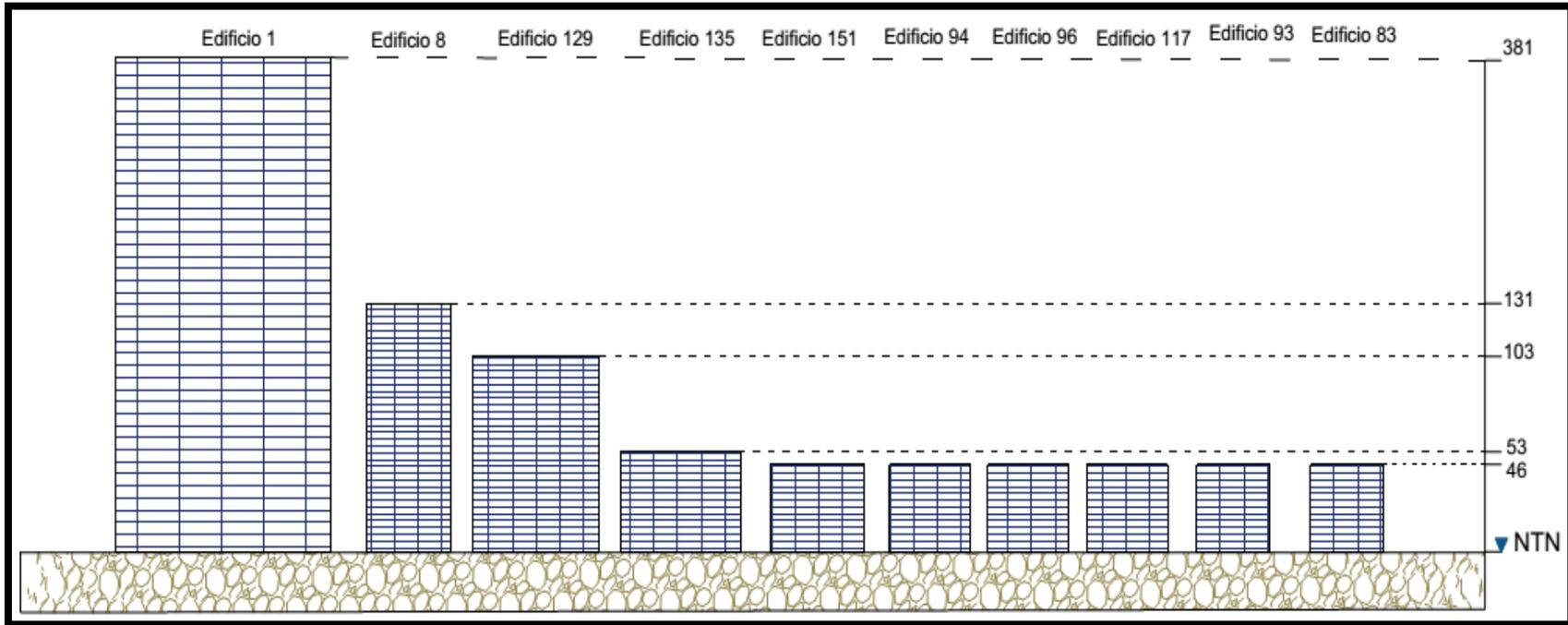


ILUSTRACIÓN 4.3: REPRESENTACIÓN DE LA ALTURA DE MODELOS DE EDIFICIOS

4.2 Consideraciones generales para la modelación de edificios

Se consideró que los edificios 1, 2 y 8 son de acero y los demás de concreto. También se asume que los edificios están ubicados en la Avenida Reforma, en la delegación Cuauhtémoc, y que son tipo B de acuerdo a su importancia. La tabla 4.3 presenta un resumen de los datos para realizar los análisis.

Ubicación	Reforma, Delg. Cuauhtémoc
Clasificación	B
Zona Eólica	Zona I
Velocidad Regional	36 m/s
Rugosidad del Terreno	R4
Tipo de topografía	T3
Coefficiente local de presión	Construcción cerrada
Densidad promedio de edificios	Acero = 195 kg/m ³
	Concreto = 455 kg/m ³
Fracción de amortiguamiento crítico	Acero = 0.01
	Concreto = 0.02

TABLA 4.3: CONSIDERACIONES GENERALES.

La masa de cada edificio se obtiene multiplicando el área de la base de los edificios ($b*d$) por la altura (H) por la densidad promedio (γ) de los edificios de acero y concreto, respectivamente.

$$m = w * b * H * \gamma \quad (30)$$

Con ayuda de la ecuación (30), la rigidez será igual a:

$$k = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 m \quad (31)$$

4.3 Análisis empleando el Factor de Amplificación Dinámica

Para el análisis con el Factor de Amplificación Dinámica se empleó el programa Génesis SimVT (Ortegón Esparza y Pozos Estrada, 2016). Este es un software integrado de análisis de edificios de cortante ante viento turbulento. Este programa permite analizar, mediante un oscilador, los efectos que el viento turbulento produce en la estructura: El programa puede analizar el modelo por diferentes métodos, pero nosotros nos enfocaremos en el método con el Factor de Respuesta de Ráfaga.

Lo único que el programa requiere para analizar son las características básicas de nuestro modelo, como son el número de grados de libertad, la masa, la rigidez y la altura. Para el análisis de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento (2004) se requiere ingresar al programa la clasificación de la estructura, la zona eólica, la rugosidad del terreno, el factor de topografía, el área expuesta, la permeabilidad (construcción cerrada) y el material de la estructura (concreto o acero). Las ilustraciones 4.4 y 4.5 muestran algunas pantallas del programa Génesis SimVT (Ortegón Esparza y Pozos Estrada, 2016), en donde se introducen los parámetros para el análisis.

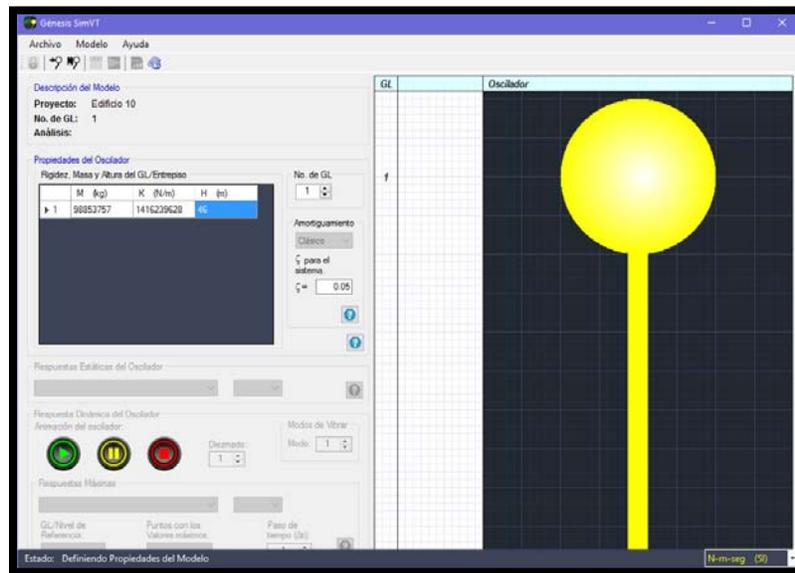


ILUSTRACIÓN 4.4: PROPIEDADES DE MODELACIÓN EN PROGRAMA GÉNESIS SIMVT

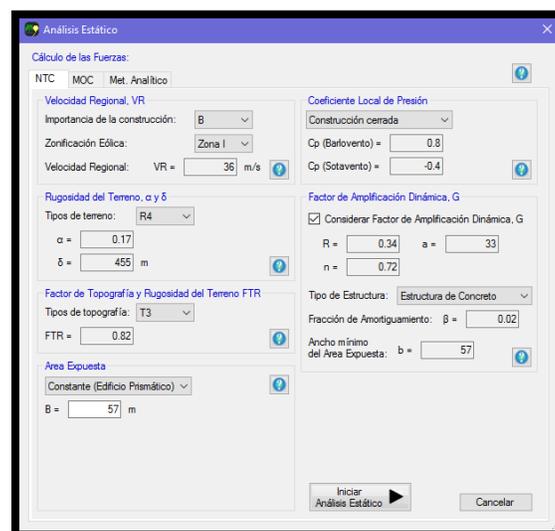


ILUSTRACIÓN 4.5: ANÁLISIS ESTÁTICO EN PROGRAMA GÉNESIS SIMVT

Los resultados obtenidos con el programa Génesis SimVT (Ortegón Esparza y Pozos Estrada, 2016) se resumen en la siguiente tabla.

Edificio	M	K	B	H	Fuerzas estáticas actuantes	Desplazamiento	Factor de amplificación
No.	kg	N/m	m	m	N	m	Adim
1	577931666.72	331192156.85	130	381	95,751,920.01	0.28911	1.139
2	44676100.51	113616799.77	51	131	9,948,969.39	0.08757	1.262
3	58861952.92	1168842995.04	41	46	1,928,505.35	0.00165	1.236
4	43715972.52	1005674156.04	44	46	2,040,300.76	0.00203	1.219
5	64808639.37	1934625731.11	49	46	2,224,414.98	0.00115	1.193
6	72960450.69	1704356888.15	49	46	2,238,141.99	0.00131	1.201
7	51948954.08	1159399911.49	49	46	2,241,044.51	0.00193	1.202
8	138194874.91	2424762214.40	77	103	8,627,172.30	0.00356	1.000
9	128054171.82	5263823480.80	73	53	3,631,861.69	0.00069	1.082
10	98853757.49	1416239628.40	57	46	2,589,631.45	0.00183	1.194

Acero	
Concreto	

TABLA 4.4: RESULTADOS ANÁLISIS ESTÁTICO

Para validar los resultados que obtuvimos con el programa Génesis SimVT (Ortegón Esparza y Pozos Estrada, 2016), realizamos la comprobación del Factor de Respuesta de Ráfaga (G) siguiendo los lineamientos y parámetros de las Normas Técnicas y el resultado se muestra en la tabla 4.5, en la última columna.

Edificio	Factor de variación de la altura	Velocidad de Diseño	Presión de Diseño	Factor correctivo	g	B	β	v	n ₀	S	V _H	F	X ₀	G
No.	$F\alpha=(z/10)^\alpha$	m/s	Kg/m ²	Ce										
1	1.86	54.81	173.05	5.82	1.58	0.2684	0.01	0.12	0.12	0.0751	50.64	0.42	2.90	1.14
2	1.55	45.72	120.39	2.70	1.65	0.6026	0.01	0.21	0.25	0.0615	34.49	0.23	8.98	1.26
3	1.29	38.22	84.16	1.26	1.65	0.8150	0.02	0.21	0.71	0.0170	23.61	0.09	36.65	1.24
4	1.29	38.22	84.16	1.26	1.65	0.7962	0.02	0.20	0.76	0.0139	23.61	0.09	39.45	1.22
5	1.29	38.22	84.16	1.26	1.64	0.7674	0.02	0.19	0.87	0.0099	23.61	0.08	44.94	1.19
6	1.29	38.22	84.16	1.26	1.64	0.7674	0.02	0.20	0.77	0.0125	23.61	0.09	39.76	1.20
7	1.29	38.22	84.16	1.26	1.64	0.7674	0.02	0.20	0.75	0.0130	23.61	0.09	38.86	1.20
8	1.49	43.88	110.93	2.27	1.68	0.5539	0.01	0.26	0.67	0.0090	31.63	0.11	25.72	0.96
9	1.33	39.20	88.51	1.41	1.63	0.6447	0.02	0.17	1.02	0.0050	24.90	0.07	49.99	1.08
10	1.29	38.22	84.16	1.26	1.64	0.7262	0.02	0.19	0.60	0.0165	23.61	0.10	31.13	1.20

TABLA 4.5: VERIFICACIÓN FACTOR DE RESPUESTA DE RÁFAGA

4.4 Programación con MATLAB para Análisis Dinámico

Para el análisis dinámico aprovechamos los recursos que ofrece la programación en MATLAB. Se empleó el programa desarrollado con la implementación del Método de Newmark, denominado “Método promedio de aceleración”. Para los análisis con el método de Newmark se emplearon los mismos parámetros que para los análisis con el Factor de Respuesta de Ráfaga.

En esta sección del código de programación se definen las condiciones iniciales con las que se analizará el modelo.

% Condiciones iniciales para un edificio

```
m = 44676101;      %masa
k = 113616800;     %rigidez
omega = sqrt (k/m); %frecuencia
psi = 0.01;        % de amortiguamiento
c = 2 * psi * omega * m; %coeficiente de amortiguamiento
u0 = 0;
v0 = 0;
p0 (1) = 0;
Dt = 0.1;
```

En esta parte se definen los cálculos a realizar de acuerdo a las condiciones iniciales.

%Cálculo de parámetros empleados en el método de Newmark

```
A0 = (p0 (1) - c * v0 - k * u0) / m;
kt = k + 2 * c / Dt + 4 * m / (Dt) ^ 2;
a = 4 * m / Dt + 2 * c;
b = 2 * m;
```

En esta parte del programa se emplean las condiciones iniciales y las fuerzas turbulentas del viento simuladas para obtener la respuesta (desplazamientos).

%Cálculo para cada delta t=0

```
n = length (p0);
for i = 1: 1: n - 1
    Dpt0 (i,1) = (p0 (i + 1) - p0 (i)) + a * v0 + b * A0;
    Du0 (i,1) = Dpt0 (i, 1) / kt;
    Dv0 (i,1) = (2 * Du0 (i, 1) / Dt) - 2 * v0;
    DA0 (i,1) = 4 / Dt ^ 2 * (Du0 (i,1) - Dt * v0) - 2 * A0;
    Despl (i,1) = u0 + Du0 (i, 1);
    Vel (i,1) = v0 + Dv0 (i,1);
    Acel (i,1) = A0 + DA0 (i,1);
    u0 = Despl (i,1);
    v0 = Vel (i,1);
    A0 = Acel (i,1);
End
```

El código anterior se usó para hacer 30 iteraciones del cálculo de cada edificio, es decir, simulamos 30 distribuciones de la fuerza del viento turbulento, lo que nos permitió obtener desplazamientos máximos en cada iteración, lo anterior con el fin de promediar estos desplazamientos y obtener un sólo máximo promedio para cada edificio. En la tabla 4.5 se muestra parte de la simulación con los desplazamientos máximos de cada iteración.

Edificio	Iteración											
	1	2	3	4	5	...	25	26	27	28	29	30
	m											
1	0.6212	0.7245	0.6772	0.8548	0.8877	...	0.8092	0.7975	0.6153	0.8638	0.7665	0.7336
2	0.1723	0.1497	0.1592	0.1845	0.1632	...	0.1933	0.1441	0.1428	0.1302	0.1684	0.1482
3	0.0026	0.0024	0.0029	0.0023	0.0025	...	0.0018	0.0023	0.0024	0.0022	0.0019	0.0022
4	0.0025	0.0027	0.0025	0.0027	0.0028	...	0.0027	0.0027	0.0041	0.0024	0.0022	0.0027
5	0.0014	0.0017	0.0025	0.0016	0.0016	...	0.0015	0.0018	0.0022	0.0018	0.0017	0.0018
6	0.0016	0.0023	0.0017	0.0018	0.0019	...	0.0017	0.0016	0.0016	0.0020	0.0019	0.0018
7	0.0034	0.0027	0.0022	0.0025	0.0025	...	0.0024	0.0025	0.0027	0.0021	0.0027	0.0039
8	0.0073	0.0072	0.0073	0.0069	0.0067	...	0.0073	0.0066	0.0084	0.0072	0.0075	0.0087
9	0.0010	0.0010	0.0012	0.0012	0.0011	...	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010	0.0009
10	0.0028	0.0028	0.0029	0.0026	0.0027	...	0.0028	0.0032	0.0027	0.0024	0.0034	0.0029

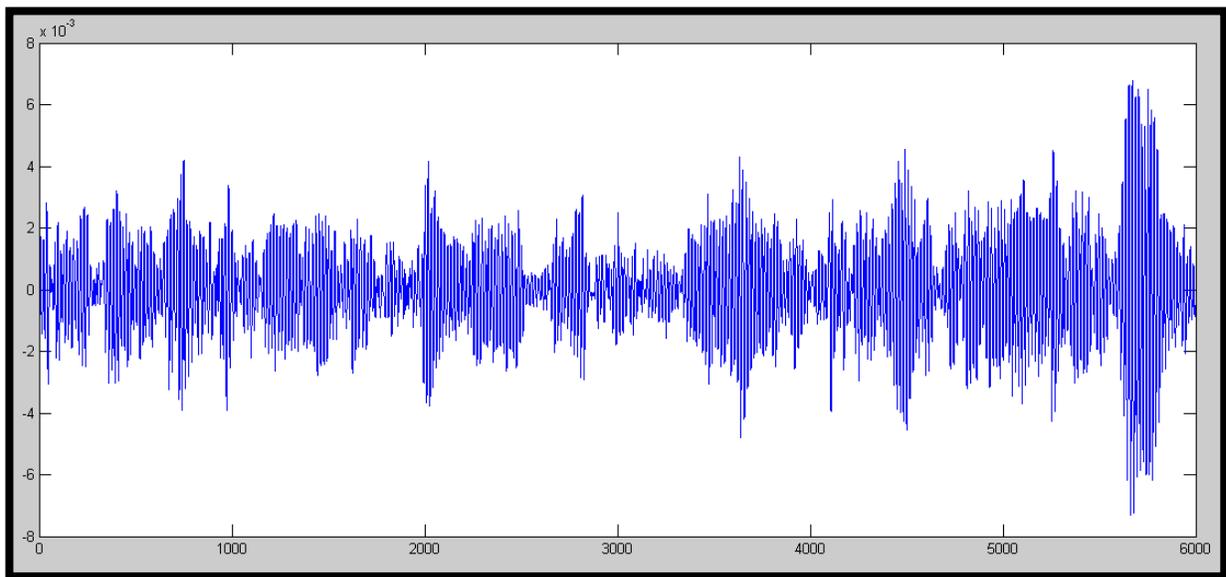
TABLA 4.6: DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS

Por último, obtuvimos el promedio de máximos de las 30 iteraciones y se muestran en la tabla 4.6.

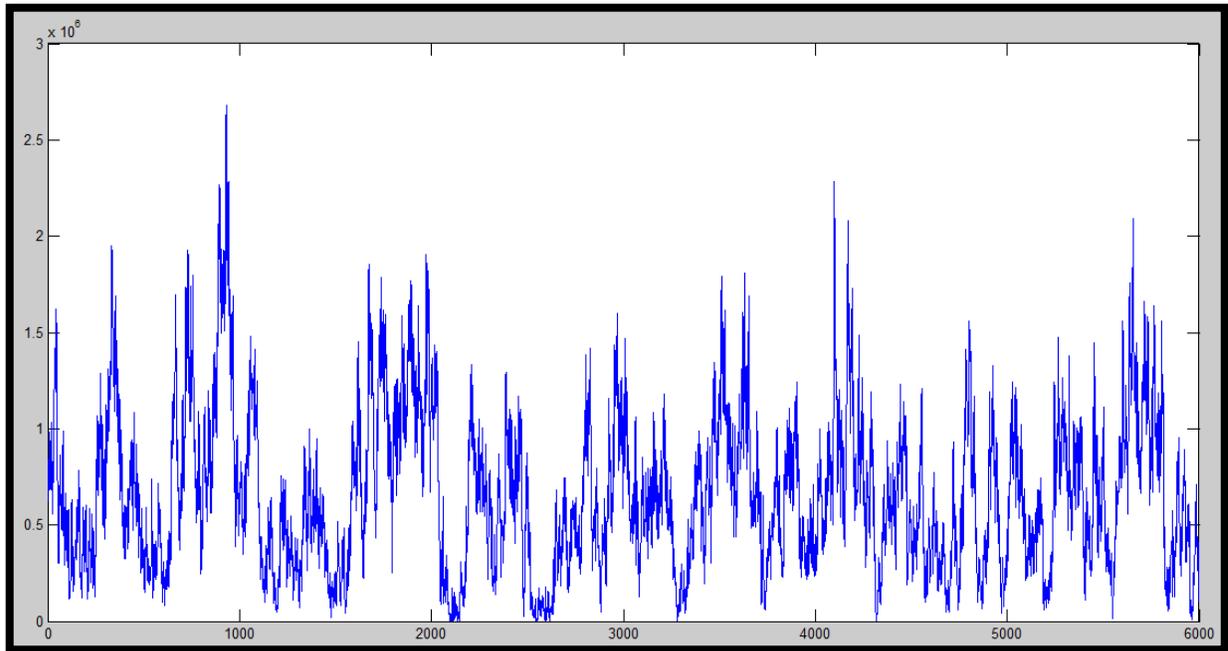
Edificio	Promedio de máximos
	m
1	0.7385
2	0.1600
3	0.0023
4	0.0028
5	0.0017
6	0.0018
7	0.0026
8	0.0073
9	0.0011
10	0.0028

TABLA 4.7: PROMEDIO DE MÁXIMOS

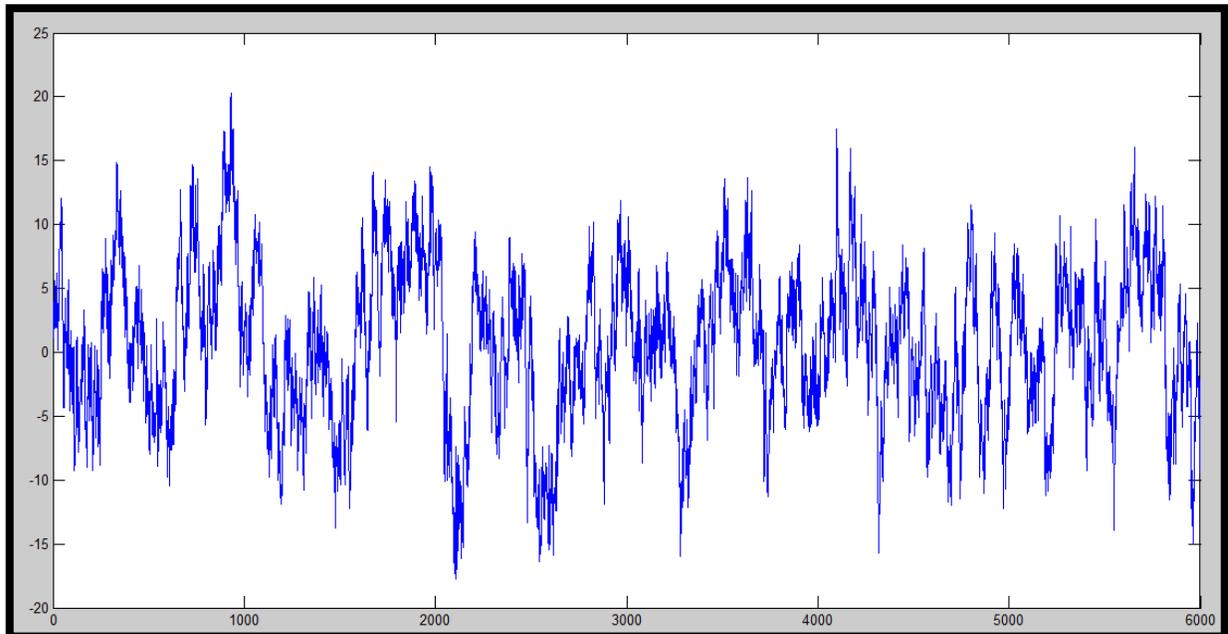
Las gráficas 1 a 3 muestran el desplazamiento, fuerza y velocidad en el edificio No. 10. Historias en el tiempo similares fueron obtenidas para el resto de los edificios.



Gráfica 1: Desplazamiento del edificio 10



Gráfica 2: Fuerza del edificio 10



Gráfica 3: Velocidad del edificio 10

5.0 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

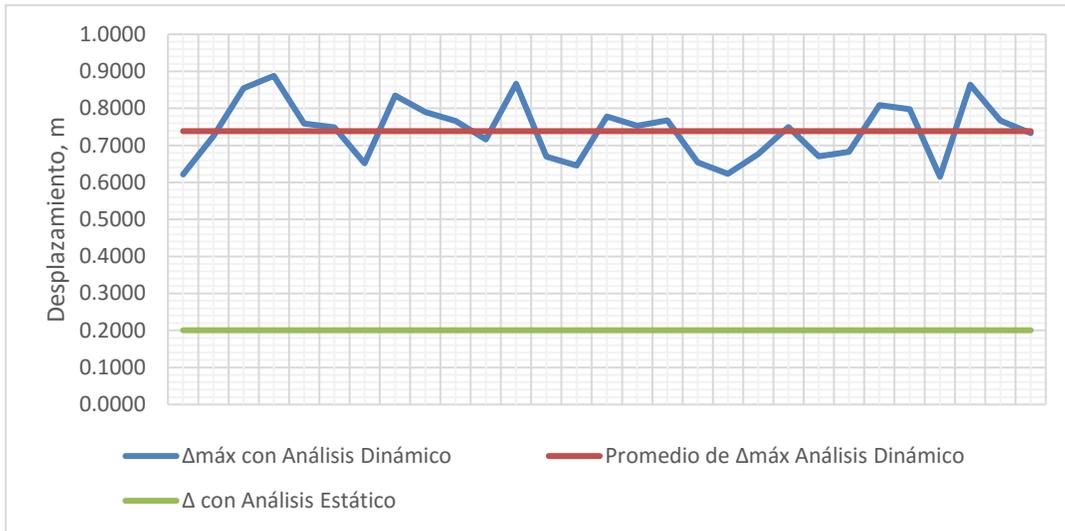
5.1 Comparación de resultados de la modelación analítica y matemática de osciladores sometidos al viento

Para verificar los cálculos del programa Génesis SimVT (Ortegón Esparza y Pozos Estrada, 2016) para el análisis estático equivalente, se calculó manualmente el Factor de Respuesta de Ráfaga de acuerdo a las NTC-DV (2004), y la comparación se muestra en la tabla 5.1.

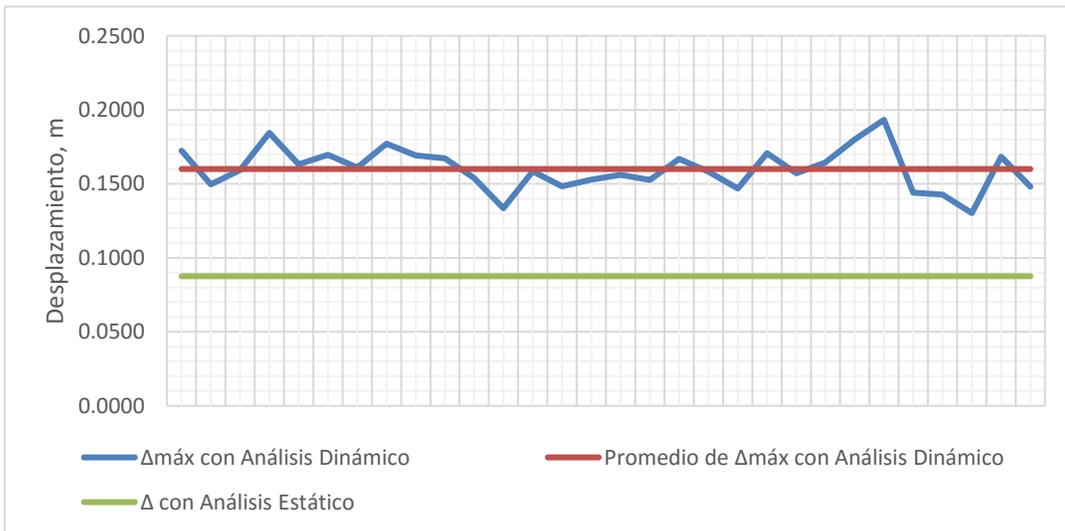
Factor de Respuesta de Ráfaga	
Génesis SimVT	NTC-DV
1.139	1.140
1.262	1.260
1.236	1.239
1.219	1.220
1.193	1.195
1.201	1.203
1.202	1.204
1.000	0.956
1.082	1.082
1.194	1.196

TABLA 5.1: COMPARACIÓN FACTOR DE RESPUESTA DE RÁFAGA

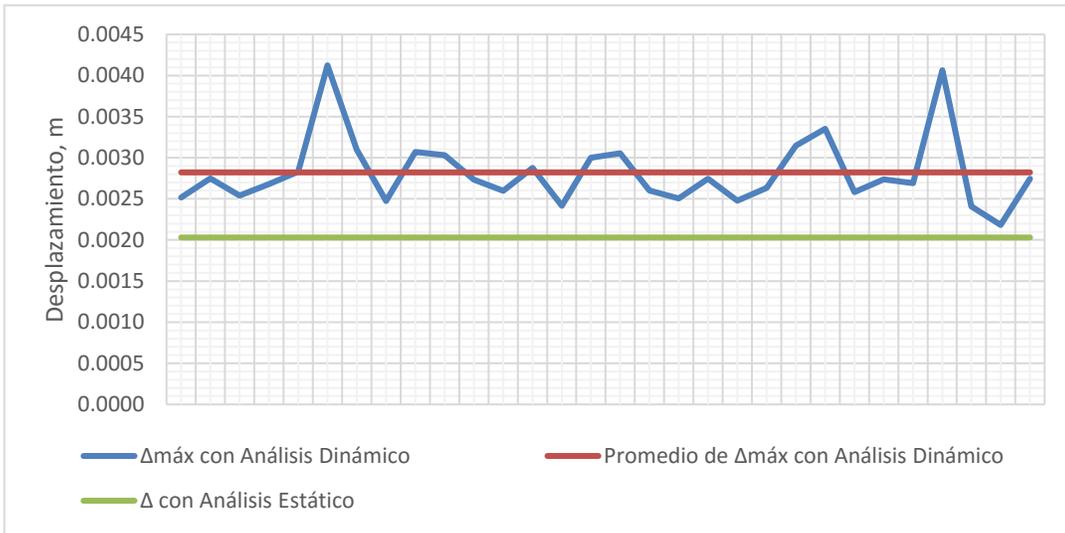
Los resultados son prácticamente los mismos, lo cual corrobora que los resultados obtenidos con el programa son confiables. Una vez hecha esta comparación pasamos a comparar estos resultados con los obtenidos del análisis dinámico realizado con el programa de MATLAB. Las siguientes gráficas muestran la comparación de los desplazamientos máximos (30 simulaciones), el promedio de éstos y el resultado obtenido del análisis estático equivalente. La comparación gráfica se hace sólo para algunos de los edificios seleccionados.



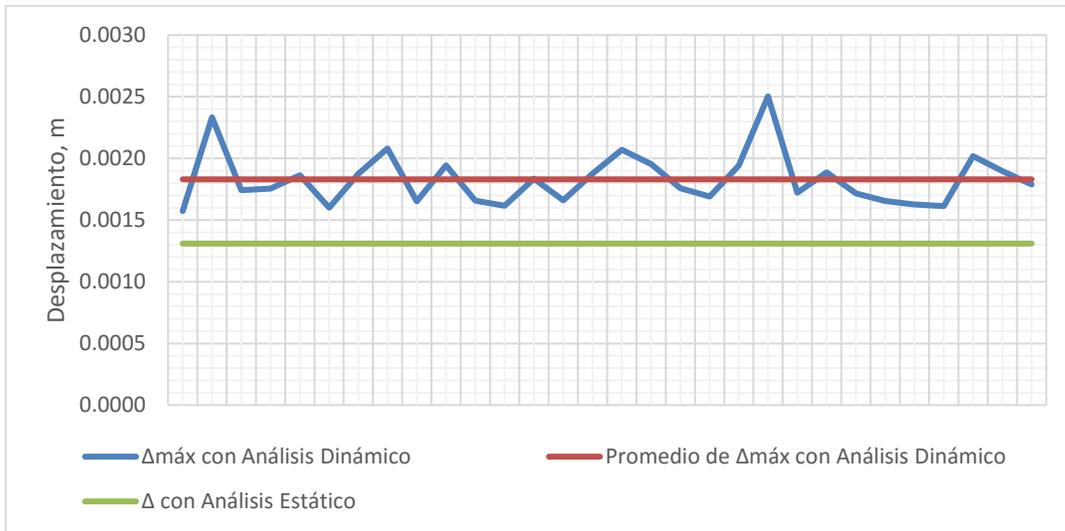
Gráfica 4 Comparación de desplazamientos Edificio 1



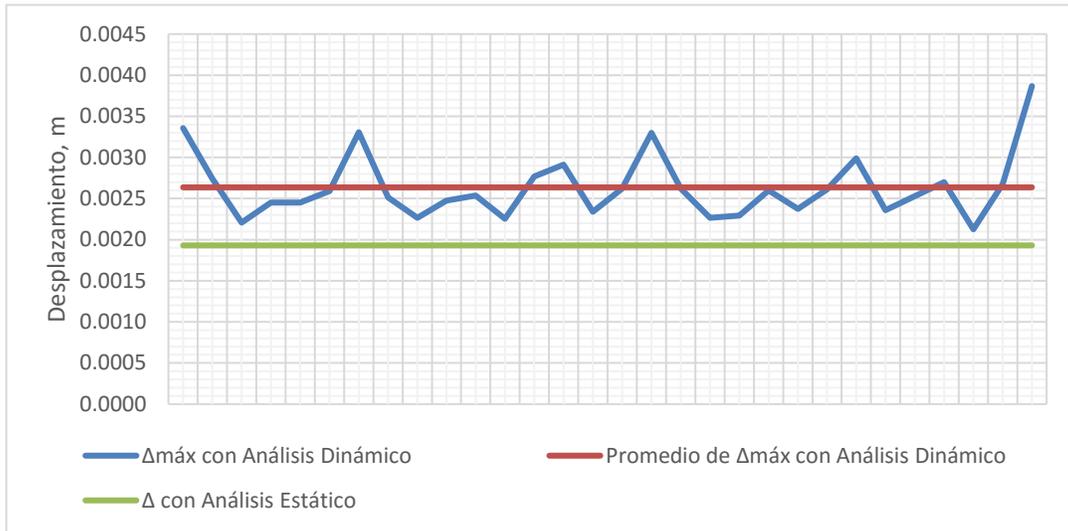
Gráfica 5: Comparación de desplazamientos Edificio 2



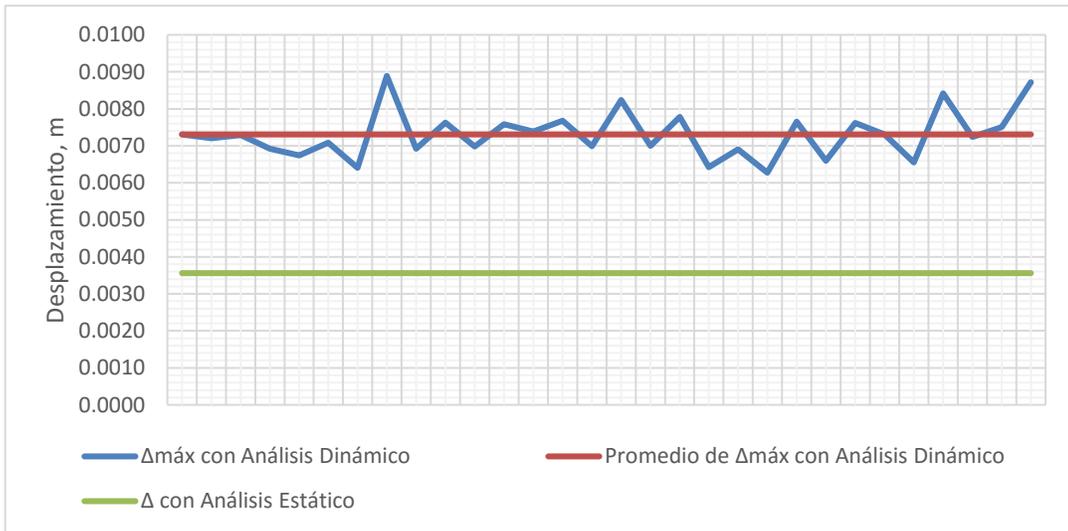
Gráfica 6: Comparación de desplazamientos Edificio 4



Gráfica 7: Comparación de desplazamientos Edificio 6



Gráfica 8: Comparación de desplazamientos Edificio 7



Gráfica 9: Comparación de desplazamientos Edificio 8

Se observa que ningún desplazamiento obtenido con el análisis estático equivalente es mayor que los máximos obtenidos con el análisis dinámico. Se observa también que el promedio de los máximos es mayor al valor obtenido con las fuerzas estáticas equivalentes.

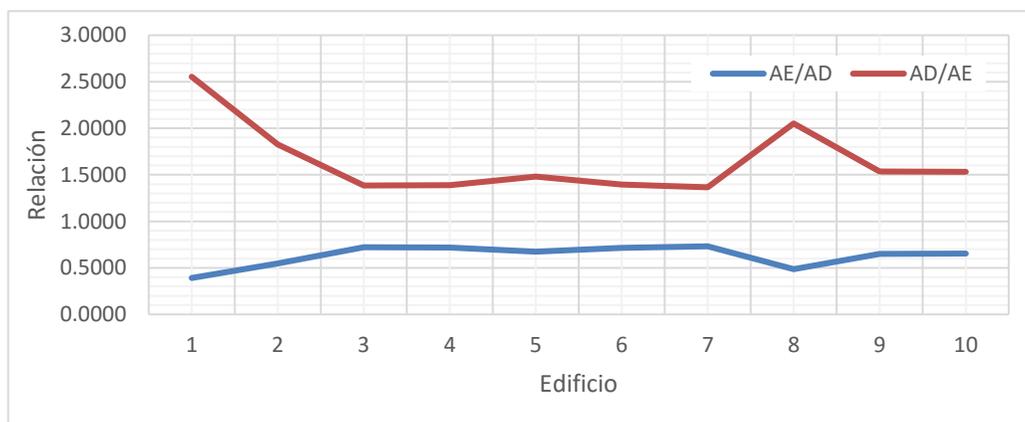
La tabla 5.2 muestra un resumen de los resultados obtenidos con las fuerzas estáticas equivalentes (AE) y el promedio de los máximos (AD).

Edificio	AE	AD	Relación AE/AD	Relación AD/AE	AE Cumple	AD Cumple
	m	m			NTC-DV	NTC-DV
1	0.2891	0.7385	0.3915	2.5543	NO	NO
2	0.0876	0.1600	0.5473	1.8271	NO	NO
3	0.0017	0.0023	0.7212	1.3866	SI	SI
4	0.0020	0.0028	0.7194	1.3901	SI	SI
5	0.0012	0.0017	0.6752	1.4811	SI	SI
6	0.0013	0.0018	0.7157	1.3973	SI	SI
7	0.0019	0.0026	0.7320	1.3660	SI	SI
8	0.0036	0.0073	0.4871	2.0531	SI	NO
9	0.0007	0.0011	0.6513	1.5354	SI	SI
10	0.0018	0.0028	0.6520	1.5338	SI	SI

TABLA 5.2: COMPARACIÓN DE ANÁLISIS

Se observa en la tabla 5.2 que los resultados obtenidos para los edificios de concreto son más consistentes entre ellos; sin embargo, en los edificios de acero (edificios 1 y 2) se tiene una desproporción muy notoria. Lo anterior puede deberse a la altura considerable de estos edificios, la cual tiene un impacto muy importante en la determinación de la respuesta. Ninguno de estos dos edificios cumple con la norma, que especifica que se debe cumplir con un desplazamiento máximo de 0.005 m, cuando no haya elementos de relleno que puedan tener algún detrimento a causa de la deformación angular. Se observa también una desproporción de los resultados al aplicar el método con fuerzas estáticas y dinámicas para el edificio 8 (edificio de acero), y que el desplazamiento obtenido con el análisis estático cumple con la norma, mientras que el calculado con el análisis dinámico no cumple.

En la gráfica 10 se presenta una comparación de las relaciones AE/AD y AD/AE, en donde se observa un comportamiento más uniforme para los edificios de concreto, y menos para los edificios de acero.



Gráfica 10: Comparación de las relaciones AE/AD y AD/AE

6.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Los métodos empleados para el análisis de los edificios sometidos a viento son útiles para la verificación del diseño viento-resistente; sin embargo, el método de análisis que emplea cargas estáticas equivalentes tiene como limitante la relación de aspecto H/d y el periodo fundamental de la estructura, el cual se limita a 5 segundos. El empleo del método con cargas estáticas equivalentes propuesto en las NTCDV (2004) debe ser empleado con cautela, ya que algunas de las expresiones para el cálculo de las fuerzas pueden no ser sencillas.

Más específicamente se concluye lo siguiente:

- Se observa una gran diferencia entre los resultados obtenidos al aplicar el método de las NTCDV (2004) y el método de simulación para el edificio 1. Lo anterior se debe principalmente a la gran altura de este edificio y a su periodo fundamental (8.3 segundos).
- El edificio 2, al igual que el 1, no cumple con los límites de desplazamiento de la NTCDV (2004) para ninguno de los dos métodos de análisis. La altura de este edificio es considerable (130 m), al igual que la del edificio 1.
- El edificio 8 es un caso particular ya que sí cumple con el límite de desplazamiento de las NTCDV (2004) cuando se emplean el método estático equivalente, pero no con el dinámico. Este edificio también tiene una altura importante de más de 100 m.
- La diferencia observada en la respuesta de los edificios 1, 2 y 8, cuando se aplica el método estático equivalente y el dinámico se debe principalmente a sus periodos fundamentales y a su gran altura. No se considera que el material empleado para su construcción (acero) sea un factor determinante para esto.
- La respuesta de los edificios de concreto calculada con el método estático equivalente y el dinámico son comparables.
- Es muy importante conocer las características del viento y conocer los criterios de cálculo en la región en la que se pretende realizar una construcción.
- Es importante conocer y entender el funcionamiento físico y matemático de los edificios sometidos a la acción del viento turbulento y por último la interpretación de los resultados obtenidos, independientemente del análisis que se use.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros empleados en el cálculo de la respuesta con el método estático equivalente para identificar la importancia relativa de éstos. El análisis podría ayudar a entender mejor las diferencias observadas entre la respuesta de los edificios analizados.

Para los edificios 1, 2 y 8 se recomienda hacer pruebas experimentales en túnel de viento para poder determinar bajo qué circunstancias estos edificios podrían funcionar y en qué sitio para que se pueda garantizar seguridad e integridad estructural.

Se recomienda que para edificios de gran importancia o con características geométricas y propiedades dinámicas que no se contemplen en las normas o reglamentos, se realicen estudios experimentales y analíticos de manera obligatoria.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✎ Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Viento (NTC-DV-2004) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Gaceta Oficial del Distrito Federal.
- ✎ Taranath B. (2004). Wind loads. En *Wind and Earthquake Resistant Buildings Structural Analysis and desing* (pp.1-97). New York: Marcel Dekker.
- ✎ Meli R. (1985). Diseño Sismorresistente. En *Diseño Estructural* (pp. 395-413). México: LIMUSA.
- ✎ Chopra A. (1995). Numerical Evaluation of Dinamic Response. En *Dynamics of structures* (pp. 155-187). New Jersey: Prentice Hall.
- ✎ Villarrubia M. (2004). Características de los vientos y su potencial. En *Energía Eólica* (pp 50-75). España, Barcelona: CEAC.
- ✎ Fernández Y. (2009). Sistemas Dinámicos. En *Fundamentos de sistemas dinámicos oscilatorios* (pp. 1-10). México, Puebla: Universidad Autónoma de Puebla.
- ✎ Hernández H., López A. & Muñoz C. (2008). Respuesta Dinámica. En *Respuesta dinámica de edificios debida a ráfagas de viento* (3-4). México, Guerrero: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural.
- ✎ Sendiña I. & Sanjuán M. (2002). Oscilador armónico al oscilador caótico. En *Sistemas lineales y no lineales* (pp. 1-16). España, Madrid: Universidad Rey Juan Carlos.
- ✎ Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa. (2014). Seguridad estructural. En *Diseño por Viento* (p.14). México, Ciudad de México: INIFED.

REFERENCIAS WEB

- ☒ Dirección General de Protección Civil y Emergencias. (2011). Vientos Fuertes. 2016, de Gobierno de España Sitio web: <http://www.proteccioncivil.org/web/dgpcye/vientos-fuertes>
- ☒ Asociación danesa de la industria eólica. (1997). Recursos Eólicos. 2016, de Asociación danesa de la industria eólica Sitio web: <http://xn--drmstre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/globwin.htm>
- ☒ ICARITO. (2013). Ciclones y anticiclones. 2016, de COPESA Sitio web: <http://www.icarito.cl/2009/12/ciclones-y-anticiclones.shtml/>
- ☒ Servicio Nacional de Meteorología. (2008). La Escala de la Fuerza de los Vientos de Beaufort. 2016, de Servicio Nacional de Meteorología Sitio web: http://www.srh.noaa.gov/srh/jetstream_sp/oceano/beaufort_sp_max.htm
- ☒ Astronoo. (1997). Escala Fujita. 2016, de Astronoo Sitio web: <http://www.astronoo.com/es/articulos/escala-fujita.html>

SOFTWARE DE REFERENCIA

- ☒ Génesis SimVT Beta 1.0.
- ☒ MATLAB 7.12.0.635 (R2011a)

APÉNDICE A

Cálculo del factor de amplificación dinámica (G) para los 10 edificios analizados empleando la definición de velocidad a la altura de la estructura (V_H) de acuerdo al CÓDIGO CANADIENSE (NBCC, 2005)

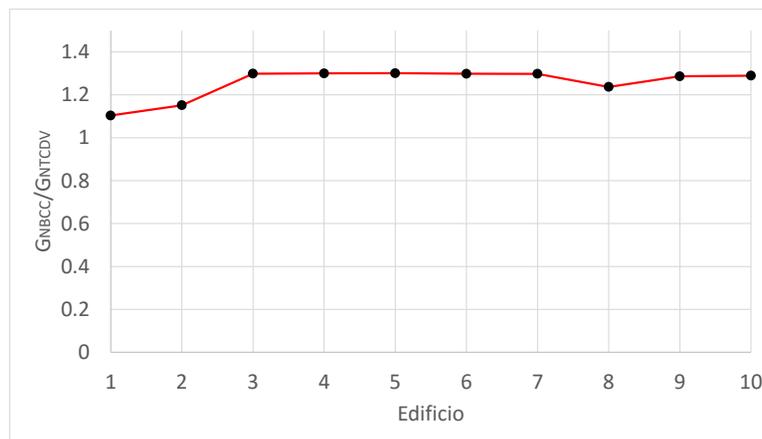
A continuación, se presenta el cálculo del factor de amplificación dinámica (G) para los 10 edificios analizados en este trabajo, pero empleando la definición de velocidad a la altura de la estructura (V_H) de acuerdo al NBCC (2005). Es importante mencionar que las NTCDV (2004) adoptan el procedimiento canadiense para el cálculo de G. Después de los análisis y revisión realizados, se cree que la adaptación de V_H en las NTCDV (2004) provee resultados físicamente imposibles (i.e., $V_{10} > V_H$, donde $H > 10$ m).

La tabla A1 muestra el cálculo de G con la definición de V_H del código canadiense y en la figura A1 se muestra una gráfica con la relación G_{NBCC}/G_{NTCDV} . Se observa en la figura A1 que el factor de amplificación calculado de acuerdo a la definición de velocidad a la altura de la estructura (V_H) canadiense proporciona valores hasta 30% mayores que las NTCDV (2004).

Tabla A1. Cálculo de G con la definición de V_H del código canadiense

Edificio	M	K	b	H	T	Factor de variación de la altura	Velocidad de Diseño	Presión de Diseño	Factor correctivo	g	B	β	v	n_0	S	V_H	F	X_0	G
No.	kg	N/m	m	m	b (s)	$F\alpha=(z/10)^{\alpha}$	m/s	K_{gg}/m^2	Ce										
1	577,931,666.72	331,192,156.85	130	381	8.3	1.86	54.81	173.05	2.49	1.58	0.2684	0.01	0.11	0.12	0.0473728029	37.40	0.37	3.93	1.26
2	44,676,100.51	113,616,799.77	51	131	3.94	1.55	45.72	120.39	1.16	1.64	0.6026	0.01	0.19	0.25	0.0382775086	25.47	0.19	12.16	1.45
3	58,861,952.92	1,168,842,995.04	41	46	1.41	1.29	38.22	84.16	0.54	1.61	0.8150	0.02	0.15	0.71	0.0100443989	17.43	0.07	49.63	1.61
4	43,715,972.52	1,005,674,156.04	44	46	1.31	1.29	38.22	84.16	0.54	1.61	0.7962	0.02	0.14	0.76	0.0081170121	17.43	0.07	53.42	1.59
5	64,808,639.37	1,934,625,731.11	49	46	1.15	1.29	38.22	84.16	0.54	1.60	0.7674	0.02	0.13	0.87	0.0057696331	17.43	0.06	60.86	1.55
6	72,960,450.69	1,704,356,888.15	49	46	1.3	1.29	38.22	84.16	0.54	1.60	0.7674	0.02	0.14	0.77	0.0072889512	17.43	0.07	53.83	1.56
7	51,948,954.08	1,159,399,911.49	49	46	1.33	1.29	38.22	84.16	0.54	1.60	0.7674	0.02	0.14	0.75	0.0075939672	17.43	0.07	52.62	1.56
8	138,194,874.91	2,424,762,214.40	77	103	1.5	1.49	43.88	110.93	0.97	1.64	0.5539	0.01	0.19	0.67	0.0051857890	23.36	0.09	34.82	1.18
9	128,054,171.82	5,263,823,480.80	73	53	0.98	1.33	39.20	88.51	0.60	1.58	0.6447	0.02	0.12	1.02	0.0028691081	18.39	0.06	67.70	1.39
10	98,853,757.49	1,416,239,628.40	57	46	1.66	1.29	38.22	84.16	0.54	1.60	0.7262	0.02	0.14	0.60	0.0097556025	17.43	0.08	42.16	1.54

Ubicación	Reforma, Delg. Cuauhtemoc		
Clasificación	B		
Zona Eólica	Zona I		
Velocidad Regional	36	m/s	23.684
Rugosidad del Terreno	R4	α	0.17
		δ	455
Tipo de topografía	T3	FTR	0.82
Coefficiente local de presión	Construcción cerrada		
Densidad promedio de edificios	Acero = 195 kg/m ³		
	Concreto = 455 kg/m ³		
Fracción de amortiguamiento crítico	Acero = 0.01		
	Concreto = 0.02		
Cp	1.2		
Parámetros según la exposición	R	0.34	
	a	33	
	n	0.72	



Gráfica A1. Relación de GNBC/GNTCDV para los edificios analizados