



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS
PROFESIONALES ACATLAN

ESTUDIOS DE RIESGO EOLICO EN ESTRUCTURAS
DESPLANTADAS EN ZONAS COSTERAS DE LA
REPUBLICA MEXICANA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
LICENCIADO EN INGENIERIA CIVIL

P R E S E N T A

PARIS REYES AGUILAR

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ASESOR: ROLANDO REYES GRECO



JULIO 2003



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.

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
LIMITACIONES.....	8
CAPITULO I: ASPECTOS METEOROLÓGICOS.....	1
I.1. ESTUDIO DE LA FORMACIÓN DEL VIENTO EN LA SUPERFICIE TERRESTRE.....	4
I.2. PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE REGISTROS DE VIENTO.....	11
I.3. RECOMPILACIÓN DE INFORMACIÓN METEOROLÓGICA DE LAS COSTAS MEXICANAS.....	21
CAPITULO II: CRITERIOS DE MODELACION DE PARAMETROS EOLICOS.....	25
II.1. CRITERIO TEÓRICO PARA EL CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO CON LA ALTURA.....	27
II.2. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD Y OTROS PARÁMETROS.....	34
II.3. VELOCIDADES DE REYNOLDS.....	37
II.4. PROPIEDADES DINÁMICAS DE LAS RÁFAGAS.....	39
CAPITULO III: VIBRACIONES ALEATORIAS.....	53
III.1. DEFINICIÓN BÁSICA DE FUNCIONES ESTOCÁSTICAS.....	55
III.2. RESPUESTA DE SISTEMAS DINÁMICOS BAJO EXCITACIONES ALEATORIAS.....	57
CAPITULO IV: FENOMENOS DE INTERACCIÓN ESTÁTICA Y DINÁMICA.....	61
IV.1. APROXIMACIÓN ESTÁTICA.....	63
IV.2. INTERACCIÓN DINÁMICA.....	69
CAPITULO V: ANÁLISIS DE REGISTROS DE VIENTO EN ZONAS COSTERAS.....	73
V.1. ZONIFICACIÓN EÓLICA ACTUAL.....	75
V.2. CÁLCULO DE PARÁMETROS ESTADÍSTICOS BÁSICOS.....	76
V.3. CÁLCULO DE DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD.....	80
CAPITULO VI: PROCESOS ESTOCÁSTICOS APLICADOS A LA INGENIERÍA EÓLICA.....	85
VI.1. DETERMINACIÓN DE PROBABILIDADES DE EXCEDENCIA EN REGISTROS DE VIENTO.....	87
VI.2. APLICACIÓN DE TEORÍAS DE VIBRACIONES ALEATORIAS EN EL MODELAJE DEL VIENTO Y SU INTERACCIÓN CON LAS ESTRUCTURAS.....	90
CAPITULO VII: RUTINA PARA ESTABLECER EL RIESGO EÓLICO.....	97
VII.1. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS ESTADÍSTICOS NECESARIOS PARA ESTABLECER EL RIESGO EÓLICO.....	99
VII.2. EJEMPLO DE APLICACIÓN.....	102
VII.3. GUÍA DE MANEJO DEL PROGRAMA SYPRE Y RUTINAS DE PROGRAMACIÓN.....	114
CONCLUSIONES.....	125
BIBLIOGRAFÍA.....	129
OTRAS FUENTES CONSULTADAS.....	131
INDICE DE TABLAS.....	133
INDICE DE ECUACIONES.....	135
INDICE DE FIGURAS.....	137

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A:

Mi padre por apoyarme y forjarme un carácter para la vida

Mi madre por criarme y educarme.

Odín, por haber sido mi fiel ejemplo durante muchos años.

Omar, por hacerme recordar

Selene, por brindarme la oportunidad de compartir una de las partes más importantes de mi vida contigo.

..., por no haberle dado una oportunidad.

Mis amigos, por compartir grandes momentos

Mis maestros, por iniciarme en mi vocación

Dios por, por haberme dado una gran familia.

Y a todos aquellos que me han apoyado para finalizar con una más de mis metas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

INTRODUCCIÓN

Sin duda alguna los efectos del viento sobre las obras civiles han sido en muchos de los casos minimizados; incluso hoy los reglamentos más actuales no exigen el elaborar un análisis dinámico preciso, sin embargo existen evidencias de las graves consecuencias que puede ocasionar el viento en edificaciones, especialmente aquellas consideradas flexibles, como son: puentes, estructuras atirantadas, torres de transmisión, antenas parabólicas, anuncios espectaculares, chimeneas, casas y naves industriales con techos inclinados, y en general toda aquella estructura cuyas paredes y/o cubiertas tengan poca rigidez, pues el daño producido en estas genera anualmente en nuestro país, pérdidas económicas que ascienden a miles de millones de pesos, sin considerar el número de muertes humanas suscitadas por este tipo de fenómenos, los cuales se acrecientan en temporada de huracanes.

Esta falta de interés en el estudio del viento ha impedido que esta rama de la ingeniería no tenga un desarrollo semejante al de otras áreas. Tan solo por poner un ejemplo en la ingeniería cólica, se ha hecho muy poco por relacionar estudios de confiabilidad estructural, en tanto en la ingeniería sísmica ya se cuenta con todo un estudio de riesgo a nivel nacional, así mismo no se ha indagado en el desarrollo de tecnologías que limiten los efectos inducidos por vientos intensos.

Dadas estas limitantes, en el presente, se propone una iniciativa básica, para establecer una respuesta de riesgo estructural en edificaciones de un solo grado de libertad¹ sometidas a efectos de vientos intensos superiores a los 30 km/h generados en algunas de las zonas costeras más importantes de la República Mexicana.

Para esto se elabora un estudio a velocidades de viento registradas desde el año de 1973, a 25 estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional², y si bien estos registros contienen datos de velocidades medias horarias, estos no son constantes, por lo que se promediaron los datos para obtener valores correspondientes a velocidades máximas anuales,

¹ Un estructura de un solo grado de libertad es aquella que solo permite desplazamientos en uno de sus nodos

² Localizadas en terrenos a campo abierto, a una altura de 10 m sobre la superficie del terreno.

tendrá una utilidad. Todo esto para una velocidad de diseño específica que al tener una distribución de probabilidades y un valor probalístico explícito, se establece la probabilidad de excedencia de la estructura a esa corriente en particular.

Para facilitar un poco el estudio de todas estas variables, se decidió elaborar un procedimiento iterativo, en el cual se introducen los datos de ubicación y mediciones del viento de la ciudad que se desea estudiar, así como las características de la superficie del terreno en donde se desplantara la estructura; una vez que se cuenta con estos datos se calcula las propiedades del viento más importantes, como son las funciones de probabilidad Fisher-Tippett II, la velocidad media y su variación con la altura, los índices y escalas longitudinales de turbulencia, los espectros de potencia, para cada uno de los criterios expuestos. Además se generan simulaciones de ráfaga, se calculan las fuerzas actuantes, se realiza el análisis dinámico correspondiente y se estima la distribución estadística de la respuesta para con ello calcular las probabilidades de excedencia.

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

LIMITACIONES

El presente trabajo se limita a estructuras de un solo grado de libertad. En el estudio de la respuesta dinámica no se contempla el efecto transversal a la dirección principal del viento, ni se presentan fenómenos de inestabilidad aeroelástica, tales como vórtices, aleteo, galopeo, etc.

Se obtiene solo la probabilidad de excedencia de la estructura, a partir de los desplazamientos producidos por las velocidades del viento, y en base a límites de servicio en relación a la utilidad estructural no se incursiona en análisis no lineal.

Los coeficientes de fuerza se establecen a partir de las condiciones que establece la Comisión Federal de Electricidad en su Manual de Obras Civiles Diseño por Viento.

Aunque el modelo matemático empleado en el presente únicamente se utiliza para obtener probabilidades de excedencia de 25 ciudades de las zonas costeras mas importantes de la Republica Mexicana, el modelo bien puede aplicarse a cualquier parte de la republica mexicana siempre y cuando se alimente al programa con los registro de velocidades de viento correspondientes al sitio de estudio. Así mismo el ejemplo de aplicación es únicamente, una muestra de lo que se puede realizar con este trabajo es decir, se puede analizar en el programa cualquier tipo de estructura que cumpla los requisitos que se establecen para ser considerada como una estructura de un solo grado de libertad

El cálculo de las deformaciones laterales, se obtuvo a partir de los coeficientes de desplazamientos permitidos por el RCDF-1993, y a pesar de que estos desplazamiento son considerados para obtener deslizamientos ocasionados por fuerzas sísmicas, se decidió emplear estos debido a que ninguno de los códigos vigentes en nuestro país establecen un desplazamiento lateral exclusivo para viento.

Así mismo en lo concerniente a probabilidades de excedencia, solo se considero para el análisis, las condiciones establecidas por la el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad, a pesar de que se hace referencia en la mayoría del texto tanto a el RCDF como a la CFE

TESIS CON

FALLA DE ORIGEN

pues la aplicación de la estadística de extremos requiere disponer de observaciones independientes e idénticamente distribuidas.

Las propiedades básicas del viento, tales como velocidad media, desviación estándar y coeficiente de variación, se ajustaron una vez analizados los histogramas correspondientes a una distribución de probabilidades Fisher-Tippett II. Por otro lado la variación de la velocidad del viento con la altura y otras propiedades de ráfaga se analizan según los criterios exponencial y logarítmico, propuestos por A. G. Davenport y el "Engineering Sciences Data Unit (ESDU)" respectivamente. Asimismo, se generaron técnicas de simulación tipo Monte Carlo para obtener las componentes de ráfagas de viento de 0 a 1000 s, para ajustarse a los espectros de potencia propuestos por Harris y el ESDU. Además, se determinaron los índices y las escalas de turbulencia pues se requieren pues son características previas e indispensables para obtener la probabilidad de riesgo cólico.

La interacción de las ráfagas del viento con los elementos de la estructura, se determinó empleando un modelo matemático basado en la ecuación de Nigan y Jennings, el cual integra la ecuación de movimiento, interpola la excitación producida por la ráfaga del viento y la velocidad de diseño, así con los desplazamientos obtenidos, se establecen probabilidades de excedencia para de una estructura en particular, tal será el caso del anuncio espectacular de tipo unipolar, analizado a lo largo de este documento, luego de haber establecido que este cumple con todas las particularidades de la estructura antes descrita.

Como frontera de utilidad estructural³ se empleo el estado límite de servicio del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal⁴ (Ref. 20), el cual establece desplazamientos máximos permitidos correspondiente a 0.012 veces la altura del edificio⁵. Además de esto se considero la influencia del tiempo durante el cual se estima que la estructura

³ En lo sucesivo se considerara como utilidad estructural, al valor correspondiente a la máxima deformación, agrietamiento, vibración o daño que afecte el correcto funcionamiento de la edificación, según lo marque el reglamento que se este utilizando.

⁴ Publicado en el Diario Oficial de la Federación el día 2 de agosto de 1993. modificado por decretos publicados los días 15 de julio de 1994 y 4 de junio de 1997.

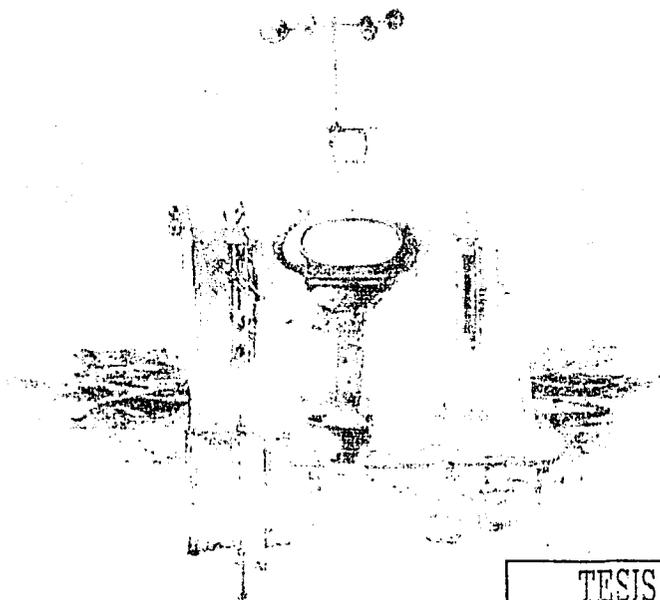
⁵ El cual debe de precisarse en centímetros, y aunque el RCDF, especifica que este, es un desplazamiento exclusivo para sismo, se decidió emplear, por que no existe en ningún código nacional un desplazamiento característico para efectos cólicos, sin mencionar que se considero que este este y no el h/500 o el h/250, este ajustaba mejor a una fuerza de tipo dinámico, como lo es el impulso ocasionado por el viento.

Algunos de los criterios anexos en este trabajo son únicamente de carácter comparativo, por lo que no es la finalidad del presente ni el elaborar la probabilidad de riesgo eólico con cada uno de los criterios mencionados ni el detallar la deducción de cada una de las ecuaciones involucradas en los análisis exponencial (Harris) ni logarítmico (ESDU), únicos criterios que son analizados a detalle.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



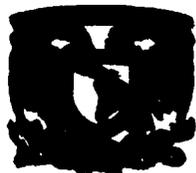
CAPITULO I: ASPECTOS METEOROLÓGICOS



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A veces podemos pasarnos años sin vivir en absoluto, y de pronto toda nuestra vida se concentra en un solo instante.

Wilde, Oscar





La atmósfera se halla en constante movimiento, alrededor del 1 al 2 por ciento de la energía proveniente del sol es convertida en energía eólica¹ a escalas que van desde las ráfagas de viento locales y de corta duración hasta los cinturones de vientos que rodean la tierra y son más o menos constantes durante todo el año.

El estudio que se ha realizando a los fenómenos atmosféricos se ha ido elaborando desde la antigüedad, civilizaciones como la Egipcia o la Fenicia orientaron sus esfuerzos a la construcción de modernos observatorios en los que lograron efectuar contemplaciones del tiempo, que les permitió después establecer relaciones entre los astros y los fenómenos meteorológicos. Aunque estas culturas tenían un gran desarrollo tecnológico para su época, la medición sistemática del tiempo no se inició hasta la llegada nuevas formas de observación empleando dispositivos capaces de medir y registrar los fenómenos atmosféricos de una forma confiable y precisa. Estos instrumentos desarrollados en los siglos XVII y XVIII estaban confinados a la superficie terrestre limitándose a evaluar las condiciones del clima próximo a la tierra. La determinación sistemática de la mayor parte de la atmósfera fue conocida en el transcurso del Siglo XX, pero pese a todos los avances tecnológicos, en los albores del siglo XXI la mayor parte de los fenómenos que se desarrollan en la atmósfera siguen siendo incomprensidos, ya que muchas de las bases de los actuales sistemas de predicción del tiempo han sido basadas en mediciones meteorológicas que tratan de ser representativas, pero lo cierto es que estas son una cantidad relativamente escasas de observaciones teniendo en cuenta el enorme tamaño de la atmósfera lo que hace difícil efectuar un estudio adecuado.

Hoy se estima que las principales causas del movimiento atmosférico se deben a las diferencias de presión y cambios en la temperatura; en el presente capítulo se expondrán los aspectos que dan origen a la formación de los vientos globales, estacionales, locales, ciclónicos y anticiclónicos. Además se describen los distintos aparatos empleados en la determinación de la dirección y velocidad del viento y por ultimo se hace referencia a los avances más significativos en materia del estudio del viento.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

¹ Esto supone una energía alrededor de 50 a 100 veces superior a la convertida en biomasa por todas las plantas de la tierra.



I.1. Estudio de la formación del viento en la superficie terrestre

Las causas principales del movimiento atmosférico y de los aspectos que dan origen a la formación de vientos y corrientes son atribuidas en el más simple de los casos² a la virtud que tiene la atmósfera de equilibrar con relativa facilidad las diferencias de presión que existen en la troposfera³. Estas diferencias de presión atribuidas a variaciones en la temperatura por causa de una mala distribución de la energía solar sobre las distintas latitudes de la superficie del planeta, no son los únicos factores que intervienen en el comportamiento de las masas de aire, pero sí son los más relevantes, ya que estos fijan las condiciones de la circulación atmosférica de tal forma que si la temperatura de regiones adyacentes difiere, el aire caliente se desplaza lejos de las áreas de alta presión hacia las zonas donde la presión es mucho menor y las masas de aire son más frías tal como lo indica la figura numero I.1.⁴

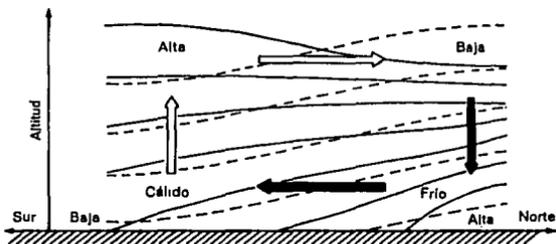


Figura I-1 Representación esquemática del movimiento atmosférico que se presenta en la troposfera

Una de las leyes básicas que explican el comportamiento de los vientos fue establecida por el científico holandés **Buys-Ballot**, (1817-1890), quien contribuye a sentar las bases de la

² Cuando el planeta no gira sobre su eje, es decir no existe movimiento de rotación.

³ Capa inferior de la atmósfera con un espesor de 11 Km. en las zonas polares y 16 Km. en el ecuador, en esta se encuentra cerca del 80 por ciento de toda la masa de gases de la atmósfera y el 99 por ciento de todo el vapor de agua.

⁴ Para conocer el comportamiento real de los movimientos de las masas de aire a gran escala y cerca de la superficie, es necesario considerar los efectos que tiene las propiedades térmicas de cada zona ya sea terrestre u oceánica, así como los efectos de la fuerza de Coriolis, la aceleración centrípeta y la fricción de la superficie terrestre.

I. Aspectos Meteorológicos



moderna meteorología. Este desarrollo un sistema de observaciones meteorológicas y advirtió que la dirección de los vientos alrededor de un centro de presión depende de que el centro se encuentre al norte o al sur del ecuador, con ello señaló lo que hoy se conoce como la primer ley de la circulación atmosférica (ley de Buys-Ballot); la cual decreta que todos ***“los vientos siempre soplaran desde las áreas de alta presión hacia las áreas de baja presión.”***

Otra de las personalidades que contribuyeron al entendimiento de los fenómenos del flujo del viento en la atmósfera fue Stephenson, quien observó que si la diferencia de presiones que existe entre la zona de alta presión con respecto a las de baja presión aumentan, se generarán vientos más fuertes. Estas observaciones fincaron las bases para instituir la segunda ley de la circulación atmosférica, que establece que ***“la velocidad del viento depende de la diferencia de presiones de los puntos entre los cuales sopla.”***

Lo anterior lo podemos relacionar con una de las leyes fundamentales que rigen el movimiento de los fluidos que relaciona un aumento en la velocidad de flujo con una disminución de la presión y viceversa. Dicha ley atribuida a Bernoulli, afirma que la energía total de un sistema de fluidos con flujo uniforme permanece constante a lo largo de la trayectoria del flujo. Esto demuestra que, una disminución de la presión del aire debe verse compensada por el aumento de la velocidad del fluido.

En nuestro planeta la mayor parte del calor y la luz solar inciden sobre las regiones ecuatoriales, sólo una pequeña parte reincide en las zonas polares. A efecto de las diferencias resultantes en la temperatura, se genera una compleja circulación atmosférica que, como uno de sus efectos, produce la transferencia de calor desde las regiones más cálidas hacia las más frías dando origen a la circulación general de los vientos.

La distribución de los vientos en el ámbito mundial se determina obteniendo los promedios de las observaciones sobre los vientos durante periodos prolongados representando así la mayor de las escalas de movimiento.

Si la superficie terrestre fuese lisa, de composición uniforme y no estuviera animada por un movimiento de rotación, las distribuciones medias de temperatura entre el ecuador y los



I.1 Estudio de la formación del viento en la superficie terrestre

polos, estarían ordenadas en zonas paralelas al ecuador, generando una sola célula de circulación térmica sin variación con la longitud geográfica tal como se muestra en la figura I.2-A. Así, cerca de la superficie terrestre el aire fluiría hacia el ecuador; y al calentarse en las regiones ecuatoriales, ascendería y avanzaría gradualmente hacia el polo donde descendería, completándose así el circuito. Sin embargo el sistema tierra-atmósfera es un sistema mecánicamente aislado, donde la energía solar se transforma continuamente, en energía potencial, parte de la cual se transforma en energía cinética que es disipada a su vez por el rozamiento con la superficie terrestre y por remolinos turbulentos de pequeña escala, de tal forma que la tasa a la que se genera energía cinética debe estar compensada con la tasa a la que se disipa⁵. Un segundo factor de control de este sistema es el llamado momento cinético de la tierra y su atmósfera, que no es sino la tendencia que tiene la atmósfera a moverse junto con la tierra alrededor de un eje de rotación, de tal forma que el momento cinético debe ser proporcional a la velocidad de rotación⁶ y al cuadrado de la distancia de la partícula de aire al eje de rotación. Con una atmósfera y una tierra que giran de forma uniforme, el momento cinético debe permanecer constante, de forma que ninguna de las partes puede ceder su momento cinético a la otra, si fuera así la rotación de la tierra no sería uniforme. Haciendo uso de este razonamiento el sistema de vientos zonales descritos en la figura I-2-A estaría formado en realidad por tres celdas latitudinales con variaciones longitudinales alrededor de cada uno de los hemisferios. Tal como se muestra en la figura I-2-B, que es una representación esquemática del flujo medio en cada latitud del globo.

La célula baja de los trópicos, llamada célula tropical de Hadley, que sigue un patrón meridional de circulación, en donde existe una deriva general de aire hacia el ecuador en torno a los 30° de latitud Norte y Sur. Debido a la rotación de la Tierra, las dos corrientes superficiales convergen hacia el ecuador desde el Norte y el Sur en un cinturón de bajas presiones⁷, donde se ven obligadas a ascender, expandirse y enfriarse constituyendo los vientos alisios⁸, por la misma rotación este cinturón de convergencia tiende a desplazarse unos cuantos grados al Norte y al Sur

⁵ Se ha estimado que esta tasa está cerca de la cifra de 2 W/m², la cual representa tan solo el 1 % de la radiación solar global media absorbida por la superficie y la atmósfera terrestres

⁶ Velocidad angular

⁷ Región denominada zona de calmas ecuatoriales situada entre los 10° de latitud Sur y los 10° de latitud Norte, en ocasiones también es llamado "doldrums"

⁸ También son llamados "trade winds", por el importante papel desempeñado en el descubrimiento y apertura al comercio del Nuevo mundo cuando los barcos dependían de las velas.

I. Aspectos Meteorológicos



de forma que en el hemisferio norte los vientos soplan del Noreste mientras que en el hemisferio sur estos provienen del Sureste.

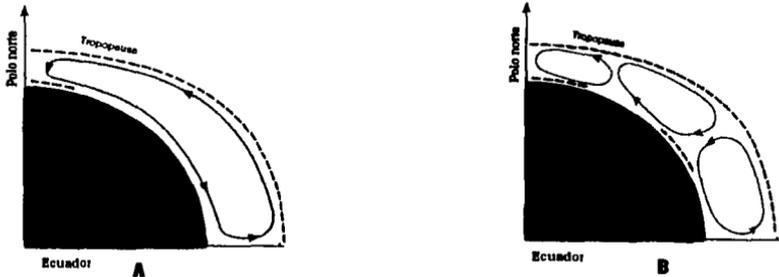


Figura 1-2 Representación esquemática del movimiento atmosférico que se presenta en la troposfera sin movimiento de rotación figura A y con movimiento de rotación figura B

A mayor altitud desde las regiones más frías de los polos, se produce una deriva compensadora de presiones altas hacia estos, llamada célula polar. Estos vientos, están formados por aires fríos que parten de estas áreas y se desvían hacia el este por la rotación de la Tierra para convertirse en los vientos polares del este, las perturbaciones ciclónicas y anticiclónicas también modifican la dirección de estos vientos. En las latitudes medias los cinturones de altas y bajas presiones generan otra banda de presiones altas con calmas, denominada célula de Ferrel, situada entre los 30° y los 60° de latitud la cual se desplazan ligeramente con en cambio de estación, tendiendo a seguir al Sol hacia el Norte o hacia el Sur. En esta célula los ramales descendentes se calientan por efecto de la compresión formando vientos suaves y variables.

Al aumentar la altura sobre la superficie de la Tierra, los vientos dominantes del oeste se aceleran y cubren una superficie mayor entre el ecuador y el polo. Así, los vientos alisios y los polares del este son bajos y, en general, son reemplazados por los del oeste sobre alturas de unos cientos de metros. Los vientos del oeste más fuertes se producen a alturas de entre 10 y 20 km y tienden a concentrarse en una banda bastante estrecha llamada corriente de chorro, donde se han medido hasta 550 km/h de velocidad.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



I.1 Estudio de la formación del viento en la superficie terrestre

Los rasgos más notables de la circulación atmosférica en las latitudes medias y altas, son los vientos ciclónicos y anticiclónicos que proceden del Oeste, en estos su velocidad aumenta rápidamente con la altitud desde 0 hasta 460 km/h en mar abierto. La presión a nivel del mar disminuye hacia el Norte desde los 30° hasta los 60° de latitud, donde tiende a producirse un mínimo, a los 60° de latitud N suele desarrollarse anticiclones poco profundos en los que prevalecen los vientos del Este. Los vórtices que giran en sentido antihorario reciben el nombre de ciclones extratropicales, y su intensidad tiende a ser máxima durante el invierno, cuando los contrastes de temperatura son mayores. Estos ciclones tienden a formarse o a regenerarse a partir de alteraciones débiles en ciertas áreas, situadas sobre todo a lo largo de las costas de Norteamérica y Asia, en el hemisferio norte, y también al este de las barreras montañosas de Norteamérica y el sur de Europa. Las tormentas se intensifican al ir desplazándose hacia el Este y el Noroeste, y tienden a alcanzar su desarrollo máximo en las regiones de Islandia y las Aleutianas.

La mayoría de las regiones donde tienden a prevalecer los anticiclones son bastante uniformes en lo que se refiere a sus características superficiales y, con los lentos movimientos divergentes, tienden a generarse grandes masas de aire con características uniformes.

Otro tipo de vientos característicos de la atmósfera terrestre son los vientos que se producen cuando los continentes ejercen una notable influencia sobre el flujo medio del aire, ya que durante el verano el aire sobre la tierra es más cálido que el situado sobre los océanos adyacentes, mientras que en invierno el aire es más frío que el que se encuentra sobre los océanos contiguos. Así, durante el verano, los continentes son lugares de baja presión con vientos que soplan de los océanos, que están más fríos, hacia los continentes que están más calientes. En invierno, sucede todo lo contrario, los continentes albergan altas presiones, y los vientos se dirigen hacia los océanos, que ahora se encuentran más cálidos.

Los efectos de este tipo de vientos son sobre todo llamativos en el hemisferio norte, donde el contraste entre la temperatura de las masas terrestres y la de los océanos son mayores,

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

I. Aspectos Meteorológicos



un ejemplo de estos vientos a gran escala son los llamados monzones⁹ del mar de China y del océano Índico (Figura I-3). El continente Americano también tiene una circulación de tipo monzónico, pero no es tan intensa como la del asiático debido a que está perturbada continuamente por ciclones y frentes migratorios que disminuye su efecto.



Figura I-3 Representación esquemática de las masas de aire que se presentan en el mar de China (monzones.)

Una circulación muy semejante pero a pequeña escala es la que se presenta con los cambios estacionales, en donde las diferencias de temperatura y presión entre la tierra y el agua se generan a diario, las brisas terrestres y marítimas son un ejemplo de estos fenómenos derivados de acuerdo a la estación del año en que nos encontremos, por ejemplo, en verano, las costas están más calientes que el mar durante el día y más fría durante la noche lo que las constituye una frontera brusca entre superficies que presentan variaciones de temperatura muy diferentes, dichas diferencias de temperatura provocan una circulación térmica parecida a la ilustrada en la figura I-4.

Las diferencias de presión entre superficies, son del orden de 2 mb^{10} , la brisa marina suele desarrollarse tres o cuatro horas después de la salida del sol y su máxima intensidad se alcanza entre la una y las dos de la tarde; la brisa terrestre, mucho menos intensa que su homóloga diurna comienza normalmente entre las 10 y las 11 de la noche y alcanza su máxima intensidad cerca del amanecer. Este tipo de vientos llega a penetrar hasta unos 50 km tierra o mar adentro.

⁹ Voz derivada del árabe que significa estación y designa a un viento de carácter estacional.

¹⁰ Disece de la unidad de presión llamada milibar.





I.1 Estudio de la formación del viento en la superficie terrestre

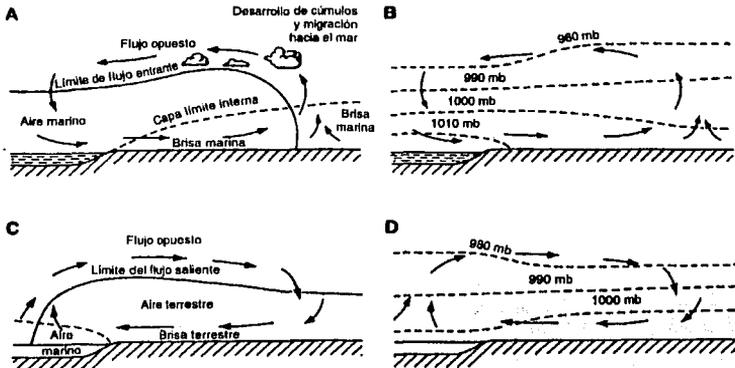


Figura I-4 Ejemplo de circulación atmosférica a pequeña escala, en la que se presentan cambios estacionales de acuerdo a la época del año

Las irregularidades del terreno también dan lugar a condiciones meteorológicas especiales. Durante el día unas tres horas después de la salida del sol hasta su puesta, el aire que se encuentra en las proximidades de un valle es calentado y forzado a ascender, mientras que los vientos que se encuentran por encima del valle inician su descenso por las laderas de una montaña próxima, debido a que se encuentran más densos en comparación con el que se sitúa en el valle. Por la noche la dirección del viento se invierte pues el aire de las montañas se enfría más rápidamente convirtiéndose en un viento que fluye ladera arriba.

Los vientos que soplan en las laderas a sotavento pueden ser bastante potentes, tal es el caso de los Fhon de los Alpes en Europa, el Chinook en las Montañas rocosas y el Zonda en los Andes.

En la figura I-5 se muestra un resumen idealizado de la circulación general de la atmósfera en la que se aprecia con detalle las células septentrionales y meridionales de Hadley y Ferrel así como los cinturones polares y los vientos alisios y contra alisios, todos ellos separados en lo alto por cuatro corrientes en chorro provenientes del oeste y una más originada en el este.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

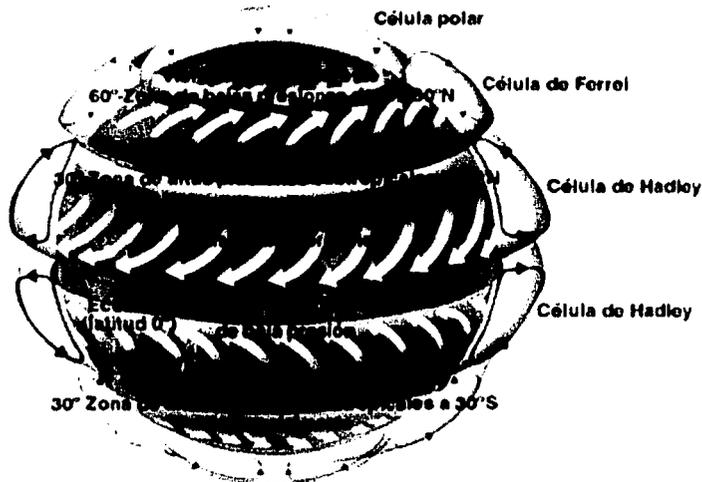


Figura 1-5 Circulación general de la atmósfera en la que se ve con detalle las células septentrionales y meridionales de Hadley y Ferrel, los cinturones polares, los vientos alisios y contra alisios, todos ello separado en lo alto por cuatro corrientes en chorro provenientes del oeste y una del este

I.2. Procedimiento para la obtención de registros de viento

La obtención de los registros de viento se ha efectuado a través de los años apoyándose en diversos instrumentos. Por ejemplo, la forma más común y quizás la más antigua de conocer la dirección del viento era observando el desplazamiento de las nubes o de alguna columna de humo, mientras que la fuerza del viento se estimaba mediante el uso de reglas de influencia basadas generalmente, en los efectos del viento sobre algún o algunos objetos fácilmente disponibles; la escala de Beaufort es un claro ejemplo de esto, sin embargo cada vez se fue requiriendo de datos más confiables con fines comerciales-marítimos, lo que llevo a perfeccionar y en ocasiones a crear una serie de instrumentos más exactos; pero fue hasta 1880 cuando se inició una oleada de investigaciones con fines prácticos para la ingeniería civil, por motivo a la falla del puente Tay en Inglaterra.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



I.2 Procedimiento para la obtención de registros de viento

Si bien la veleta es uno de los instrumentos más antiguos para indicar la dirección del viento, a través de los años se han producido diferentes tipos, en las que se ha modificado su diseño y el tipo de materiales empleados para su construcción, por ello en este trabajo solo se señalará las que mayores usos han tenido.

En la figura I.6-A podemos observar el diseño clásico de una veleta. Este consta de una barra horizontal montada sobre otra barra vertical de menores dimensiones, en uno de los extremos de esta se sujeta un plato llano, el cual puede tomar casi cualquier forma, según sea la imaginación del fabricante, por el otro extremo normalmente se encuentra un contrapeso de menor peso con relación al plato. Una forma algo superior conocida como veleta extendida se muestra en la figura I.6-B, la cual consiste de dos platos simétricos separados por un ángulo ligero. Este tipo de veletas es mucho más sensible a pequeños cambios en la dirección del viento que la veleta de un solo plato. Un tipo de veleta aun más eficiente es la veleta de sección aerodinámica mostrada en la figura I.6-C, la cual no solo cuenta con un plato aerodinámico que la hace a esta mucho más precisa, sino que además cuenta con un diseño especial en su eje horizontal de tal forma que la distancia que existe del plato a la base de la barra vertical debe ser de tres o cuatro veces mayor que la distancia del cordón que sostiene la aguja de dirección esto con el fin lograr una mejor sensibilidad en el instrumento.

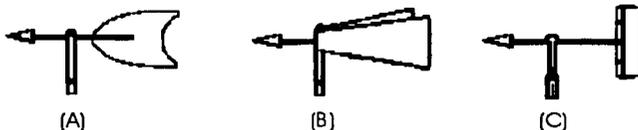


Figura I-6 Diseños de veletas de viento comúnmente usadas, (A) veleta clásica, (B) veleta extendida, (C) veleta aerodinámica

Cuando se carece de una veleta de viento un buen sustituto de la misma, es el llamado calcetín de viento usado frecuentemente en los aeropuertos. Este utensilio consiste en una bolsa de tela en forma de cono truncado abierto por ambos extremos, el extremo más grande se ata a un arillo que esta montado sobre un eje vertical de tal forma que permita su libre rotación, al entrar el flujo de aire por el extremo mayor del cono provoca que la bolsa se extienda formando un cono que indica la dirección del viento.

I. Aspectos Meteorológicos



En nuestros días los errores serios leyendo la dirección del viento no son excluidos aun cuando todas las veletas de viento cuentan con brazos estacionarios que apuntan a las direcciones cardinales, por eso los instrumentos más modernos para indicar la dirección del viento están contruidos de tal forma que las fluctuaciones que va experimentando la dirección del viento, sean transmitidas, en alguna forma, a un indicador o registrador automático.

Para la determinación de la velocidad del viento puede utilizarse un instrumento clásico conocido como anemómetro. Puesto que existen anemómetros de tipos muy diversos, Brazier efectuó una clasificación de los distintos tipos de anemómetros de acuerdo a los medios con que efectúan la medición del viento para ello uso la clasificación siguiente:

- 1) Los anemómetros de la rotación
 - a) Anemómetros de molino de viento o hélice.
 - b) Anemómetros de taza
 - c) Anemómetros especiales
- 2) Los anemómetros de placa de presión
 - a) Anemómetro de péndulo, la placa permite el giro
 - b) Anemómetro de placa fija, la placa se mantiene normal al viento
- 3) Los anemómetros de presión
- 4) Anemómetros que dependen de la temperatura del aire
 - a) Anemómetro de alambre térmico
 - b) El termómetro de Kata
 - c) El anemómetro del termómetro acalorado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El primer registro de un anemómetro de rotación se llevo a cabo en el año de 1752, cuando Schober encontró la forma de relacionar la rotación de un pequeño molino de viento con la velocidad del aire. Casi un siglo después, el anemómetro de cazoletas fue desarrollado por Robinsón en 1846, situándose dentro de los anemómetros de rotación más comunes en nuestros días. Para obtener las mediciones de las velocidades del viento el diseño del anemómetro de cazoletas original, estaba provisto de cuatro cazoletas semiesféricas, situadas en los extremos de brazos horizontales que parten de un eje vertical capaz de girar. Tras las investigaciones de Patterson, la rueda de tres tazas llegó a ser más preferida, figura I-7. Los aparatos más recientes de este mismo tipo emplean tazas de forma cónica, con una ganancia en fuerza y desempeño.



I.2 Procedimiento para la obtención de registros de viento

Este tipo de aparatos gira a mayor prontitud cuanto mayor sea la velocidad del viento. Para relacionar el número de revoluciones del aparato con la velocidad de viento se emplean hoy diferentes métodos y dispositivos que se describen un poco más adelante.

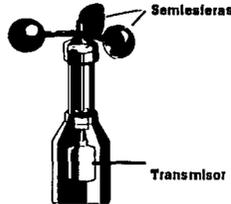


Figura I-7 Esquema representativo de un anemómetro de rotación con cazoletas

En recientes años no solo se ha modificado la geometría de la taza sino que ha habido una tendencia general a reducir el tamaño y peso de la taza. Los últimos diseños se han hecho de aleaciones de aluminio y son aproximadamente cuatro veces menores que el anemómetro de "Kew" que fue empleado en las islas británicas durante muchos años. Mucho se puede decir sobre estos cambios en los diseños, sin lugar a dudas, la trascendencia en la exactitud del instrumento en vientos borrascosos ha sido una virtud importante ya que casi todos vientos naturales son borrascosos en determinada magnitud.

De acuerdo a la forma en que obtienen los registros existen tres tipos de anemómetros de copas:

- ↳ El de contacto
- ↳ El de contador y
- ↳ El de generador.

El primero, está dotado de un dial con contadores que registran la velocidad del viento en millas. Suelen utilizarse para medir velocidades medias del viento en intervalos de tiempo relativamente grandes ya sean horas o días

I. Aspectos Meteorológicos



El segundo tipo de anemómetro esta equipado con contactos eléctricos que se cierran momentáneamente al paso de un determinado número de cierres se acciona un timbre. La calibración que se le da a este tipo de aparatos suele hacer contacto, cada 1/20, 1/60 o 1/120 millas de viento.

La velocidad media del viento en millas por hora se determina con el número de contactos hechos en tres minutos, suele utilizarse este tipo de anemómetros para elaborar cartas de la velocidad media del viento.

Por ultimo el anemómetro de copas generador, funciona mediante el movimiento de un pequeño imán colocado dentro de un alternador, la indicación de la velocidad del viento es registrada por un pequeño voltímetro calibrado para dar las lecturas en millas / hora o Km/h En muchas ocasiones este instrumento va dotado de una pluma registradora con el objeto de realizar una medición continua del viento. Actualmente sé esta utilizando con más frecuencia que los anemómetros de tipo Dines, pues este tiene la gran ventaja de que los registros los puede hacer a una considerable distancia de la parte sensible del anemómetro, reduciendo de esta forma costos en la instalación y el mantenimiento. Sin embargo una desventaja que tiene este tipo de sistemas es la forma característica con la que cuenta ya que el estar construido de modo que se obtenga el mínimo de fricción en su parte sensible, lo hace que girar muy deprisa en la presencia de ráfagas, por lo que se ha optado utilizarlo para recoger datos de las velocidades medias.

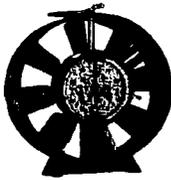
Otro tipo de anemómetro rotatorio es aquel que en lugar de cazoletas está equipado con hélices, comúnmente llamado anemómetro de molino de viento; estos anemómetros no son muy empleados ahora, pero cuentan con ciertas propiedades importantes, por ejemplo, la relación casi lineal entre la velocidad del viento y la velocidad angular del molino de viento que se obtiene si la resistencia a la fricción es relativamente baja.

Hay dos tipos de anemómetros del molino de viento: los de piso y los que cuentan con una veleta integrada. El primero figura I-8A es normalmente usado para medir el flujo de aire en conductos grandes. Las aspas de tales instrumentos normalmente son de mica, para que el momento de inercia del sistema sea muy pequeño; esto permite al instrumento dar buenos

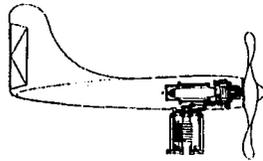


I.2 Procedimiento para la obtención de registros de viento

resultados en un viento inestable. Las lecturas generalmente se efectúan sobre una carátula provista de con varios diales.



A



B

Figura I-8 Anemómetros de rotación por aletas, la figura A muestra un anemómetro de piso que incluye manómetro en tanto la figura B muestra en anemómetro con aleta integrada

En años recientes los anemómetros de molino de viento provistos con una veleta han entrado en uso. Un ejemplo es el Aerovane y el Windial fabricados por la división de instrumentación de la corporación Bendix Aviación Figura I-8B. Las tres aspas con las que cuenta la hélice del molino de viento están hechas de plástico estas se conectan a un transmisor de velocidad de viento y está unido a una veleta para poder posicionarse en la dirección del viento. La dirección del viento se transmite a un indicador remoto. La velocidad del viento se modera por medio de un rotor de generación magnética y el voltaje que se genera es medido y calibraron en millas por hora.

Los anemómetros de la segunda clasificación están basado en un principio ideado por Leonardo Da Vinci en 1500, que establece que el viento ejerce una presión en cualquier cuerpo sólido que se oponga al libre flujo de este; una descripción de semejante instrumento fue publicada por Robert Hooke en 1667, este decía que si nosotros tenemos un cuerpo con una posición de referencia y este se desplaza hacia otro punto por la presión que ejerce el viento sobre el mismo cuerpo, podemos establecer una relación de la velocidad del aire con la presión del mismo.

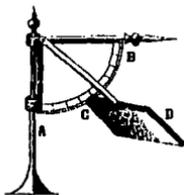
Los anemómetros de placa de presión pueden ser divididos en dos clases: los anemómetros de péndulo y los anemómetros de placa fija.

I. Aspectos Meteorológicos

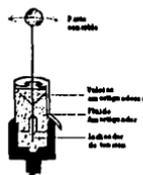


El anemómetro en péndulo figura I-9A consiste esencialmente de una placa libre CD que puede oscilar sobre un eje EF, cuando se alcanza el equilibrio la velocidad del viento se indica en la escala AB calibrada previamente. Cuando es necesario efectuar lecturas de velocidades correspondientes a fuertes vientos, es común colocar pequeñas placas metálicas con el fin de aumentar la resistencia que ejerce la placa al ser desplazada.

Este tipo de anemómetros tiene dos inconvenientes trascendentales: primero, el aparato siempre debe ser orientado, con ayuda de una veleta, para que el viento siempre sople perpendicularmente a superficie de la placa; segundo, a menos que se tenga un gran cuidado en el diseño del anemómetro, la resonancia entre la placa oscilante y las ráfagas del viento causan lecturas del anemómetro completamente erróneas. La asociación Británica de Investigación Eléctrica (BERA), propuso una adaptación de este tipo de instrumento para resolver el problema de la turbulencia causada por las ráfagas. El instrumento consiste en una esfera perforada, montada sobre la parte superior de un tubo, el movimiento es registrado por un indicador de tensión que genera una corriente proporcional a la presión del viento. Ver figura I-9B



A



B

Figura I-9 (A) Anemómetro en péndulo desarrollado por Hooke en 1667, (B) anemómetro de esfera desarrollado por la asociación Británica de Investigación Eléctrica (BERA)

El segundo tipo de anemómetros de placa de presión son los de placa fija (figura I-10) basados en el anemómetro desarrollado por Osler; estos aparatos cuentan con una placa plana A conectada a una aguja registradora, B. El instrumento es ajustado de tal forma que cuando una corriente de aire incide sobre la placa A el movimiento es transmitido y ajustado por un tensor, C. Este mecanismo acoplado a una veleta tiene la libertad de girar sobre un eje vertical de acuerdo a la dirección del viento. Al igual que su semejante este instrumento es poco confiable cuando se presentan algunas ráfagas repentinas. Por esto los anemómetros de placa fija han



I.2 Procedimiento para la obtención de registros de viento

caído en el olvido ya que no cuentan con una forma muy satisfactoria para efectuar un estudio detallado de las ráfagas del viento.

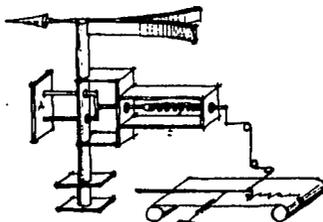


Figura I-10 Anemómetro tipo Osler

Desde los inicios del siglo XVIII se sabía que si el viento soplaba en la boca de un tubo causarían un exceso de presión en el tubo, mientras que una corriente que pasa por la boca ocasiona una succión. Cualquiera de estos dos casos se pueden usar para relacionar y medir la velocidad del viento; o los dos pueden emplearse en combinación. El anemómetro de presión parte de este principio, ya que este tipo de aparatos hacen uso de la relación entre la presión dinámica de un fluido en movimiento y la velocidad que adquiere el aire en el momento de la medición.

El Snow-Harris fue el primer instrumento basado en este principio; este tenía muchas desventajas, por ejemplo no contaba con una veleta que le permitiera girar cuando se presentaban los cambios de dirección en las corrientes de aire, por lo que se tenía que colocar un anemómetro apuntando hacia una determinada dirección de los 4 puntos cardinales, por lo que se requerían de cuatro instrumentos para efectuar las mediciones. Otro de los inconvenientes en estos aparatos era que las velocidades bajas que registraban se leían en un tubo horizontal mientras que en otro tubo vertical se leían las velocidades altas; esto traía como consecuencia que en el cambio de una velocidad baja a una alta se tenía un tiempo de retraso dando lecturas que no correspondían a los tiempos o intervalos regulares. Pero el mayor inconveniente era que la escala empleada no era lineal.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

I. Aspectos Meteorológicos



En 1890 W. H Dines, empleando una parte sensible figura I-11A y otra registradora Figura I-11B constituye el prototipo ideal de un anemómetro capaz de hacer un registro continuo de la velocidad de viento en una escala lineal. El diseño de la cabeza del anemómetro consta de un tubo hueco que apunta siempre hacia la dirección del viento con la ayuda de una veleta de sección aerodinámica. La presión ejercida sobre la cabeza del tubo sección A de la figura I-11, es comunicada con el interior de otro tubo que se encuentra dentro del soporte principal por medio de las hendeduras B. La carga de la veleta es soportada por un cojinete C. La eficiencia de la veleta y su apoyo es producto de la excelente conjugación de un tubo estacionario D y un tubo rotatorio E. La presión se conduce hacia abajo de la sección D y hasta afuera por la sección F. La succión es provocada por un atreglo de 96 pequeños agujeros en 4 filas escalonadas alrededor de G; los cuales comunican con un espacio reducido H y la toma de aire J. El conjunto de piezas se apoya en un mástil M, bajo el centro de este atraviesa un cordón K el cual se ata a la parte superior del instrumento y a un registrador de la dirección del viento. Todo el conjunto es protegido por un cilindro L, hecho de una placa de metal.

Este tipo de instrumentos generalmente vienen acompañados de un manómetro de flotación indispensable para la obtención de los registros de viento, este ingenioso invento creado por Dines, consta de un flotador diseñado para convertir las lecturas de presión en una magnitud lineal de velocidades de viento. El instrumento se muestra esquemáticamente en la figura I-12.

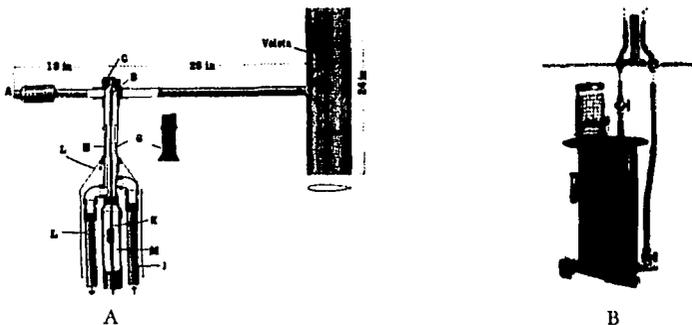


Figura I-11 Anemómetro Dines, La sección A representa la parte sensible del aparato mientras que la sección B muestra la parte registradora



I.2 Procedimiento para la obtención de registros de viento

El módulo de registro ilustrado esquemáticamente en la figura I-12 consta de un flotador C contenido en un tanque cilíndrico A, en el que se almacena una determinada cantidad de agua que permanece a un nivel constante, para ello es necesario auxiliarse de la válvula de exclusión L. El flotador C se encuentra unido en su parte superior con una varilla H que pasa a través de un corbatín en cuyo extremo está la pluma K encargada de registrar la velocidad del viento. Los efectos registrados se conjuntan y se transmiten a lo largo de E y F, pues, por ambos tubos se transmite el aumento de presión producido por el viento en la parte sensible del aparato, lo cual da lugar a un aumento de presión en el interior del flotador C, por lo tanto, este tiende a ascender. Mientras que la succión que transmite J tiende, también a hacer subir el flotador.

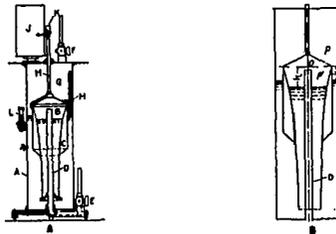


Figura I-12 Esquema ilustrativo del anemómetro Dines

La llave E se emplea para colocar la pluma registradora en la posición a partir de la cual se van a iniciar las lecturas. La sección B del flotador es necesaria para que los desplazamientos de la pluma sean proporcionales a las velocidades.

Estos aparatos cuentan con manómetros muy sensibles dado que la presión dinámica del aire es relativamente baja, aun así los errores más comunes son debidos a: cambios en la densidad del aire, viento inseguro, cambios en el peso del flotador.

Aunque no es lo habitual existen anemómetros que registran la velocidad del viento empleando modernos equipos de ultrasonido o mediante el uso de un láser; estos instrumentos son capaces de detectar el desfase de las moléculas de aire reflejadas por el sonido o la luz según sea el caso. Otro tipo de anemómetros no muy comunes son los anemómetros de hilo electro

I. Aspectos Meteorológicos



calentado los cuales detectan la velocidad del viento mediante pequeñas diferencias de temperatura entre los cables situados en el viento y en la sombra del viento (cara a sotavento).

Uno de los instrumentos más modernos para efectuar las mediciones de la velocidad del viento es el llamado 'data logger' en donde los datos de las velocidades y direcciones del viento obtenidos por el anemómetro son recogidos por una pequeña computadora que los almacena en un chip electrónico; el 'data logger' puede funcionar con una batería durante un largo período de tiempo. Según sea la capacidad del chip será necesario ir hasta el registrador a recoger el este y remplazarlo por otro virgen que recoja los datos de los días siguientes.

I.3. Recopilación de información meteorológica de las costas mexicanas

En nuestros días la recopilación de datos sobre el clima se logra con el apoyo sobre todo de la transmisión vía teletipo de mensajes codificados. La red nacional de teletipos operan como líneas multiusuario, y los datos impresos por cualquier estación aparecen al mismo tiempo en todas las demás estaciones conectadas a la misma línea. Los datos recopilados a escala nacional se intercambian a través de circuitos globales de larga distancia y a altas velocidades, es por lo que, en cerca de una hora, los informes sobre la superficie y las capas superiores de la atmósfera están disponibles en los centros regionales de muchos países. El sistema global de telecomunicaciones de la Organización Mundial de Meteorología¹¹ actúa como centro de recepción y transmisión de los datos que proceden de las estaciones de superficie y los satélites meteorológicos, así como de los que proceden de barcos, aviones y radiosondas.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura I-13 Radar de comunicaciones empleado para la transmisión de datos de una estación meteorológica a otra

¹¹ Organismo especializado de las Naciones Unidas al que ingresó nuestro país en el año de 1947



I.3 Recopilación de información meteorológica de las costas mexicanas

La transmisión de datos se efectúa en el margen de dos horas desde la recopilación de los datos, hasta la recepción de los mismos en todos los centros de previsión meteorológica en los que hay mapas climatológicos disponibles. El uso del fax ha aumentado la eficiencia de estos centros, ya que los mapas son trazados por analistas expertos y están al alcance de los meteorólogos con una mayor rapidez de lo que antes era posible, cuando se trazaban de manera manual, ya que ciertos análisis de las condiciones en la atmósfera superior son realizados de modo automático por medio de ordenadores o computadoras que, con periféricos adicionales, pueden traducir y almacenar la información codificada de las líneas de teletipo, realizar cálculos matemáticos y presentar los resultados en forma de líneas trazadas sobre mapas. Tales análisis se transmiten vía fax a las estaciones locales y son almacenados para su empleo en previsiones climatológicas numéricas.

En nuestro país el organismo encargado de recopilar y proporcionar esta información a nivel Nacional es el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), que se sujeta a los dictámenes de la Comisión Nacional del Agua, dependencia de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Los objetivos del SMN se concentran en la vigilancia continua de la atmósfera para identificar los fenómenos meteorológicos que pueden afectar las distintas actividades económicas y sobre todo, originar la pérdida de vidas humanas además de también realiza el acopio de la información climatológica nacional.

Para llevar a cabo sus objetivos el Servicio Meteorológico Nacional cuenta con la siguiente infraestructura de observación:

- ✦ Red sinóptica de superficie, integrada por 72 observatorios meteorológicos, cuyas funciones son las de observación y transmisión en tiempo real de la información de las condiciones atmosféricas.
- ✦ Banco Nacional de Datos Climatológicos, el cual concentra y archiva información proveniente de las diferentes redes climatológicas del país, incluyendo la red de la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR). Se puede contar con el archivo climatológico más importante del país, el cual incluye datos históricos desde fines del siglo pasado hasta la fecha.

I. Aspectos Meteorológicos



- Red sinóptica de altura. Consta de 15 estaciones de radiosondeo, cuya función es la observación de las capas altas de la atmósfera. Cada estación realiza mediciones de presión, temperatura, humedad y viento mediante una sonda que se eleva por medio de un globo dos veces al día.
- Red de 12 radares meteorológicos distribuidos en el Territorio Nacional. Esta red comenzó a funcionar en 1993 y proporciona información continua que se recibe en el Servicio Meteorológico Nacional, vía satélite. Los radares permiten detectar la evolución de los sistemas nubosos. Con ello puede conocerse la intensidad de la precipitación (lluvia, granizo o nieve), la altura y densidad de las nubes y su desplazamiento, así como la velocidad y dirección del viento, en un radio máximo de 480 Km alrededor de cada radar. Con la actual red de doce radares se cubre casi en su totalidad el Territorio Nacional.
- Estación terrena receptora de imágenes del satélite meteorológico GOES-8; Con esta estación se reciben imágenes cada 30 minutos de cinco diferentes bandas: una visible, tres infrarrojas y una de vapor de agua. Cada imagen cubre la región meteorológica número IV, la cual abarca México, Canadá, Estados Unidos, el Caribe y Centro América. Además, cada tres horas se recibe una imagen visible, otra infrarroja y una de vapor de agua que cubre el total del continente americano.

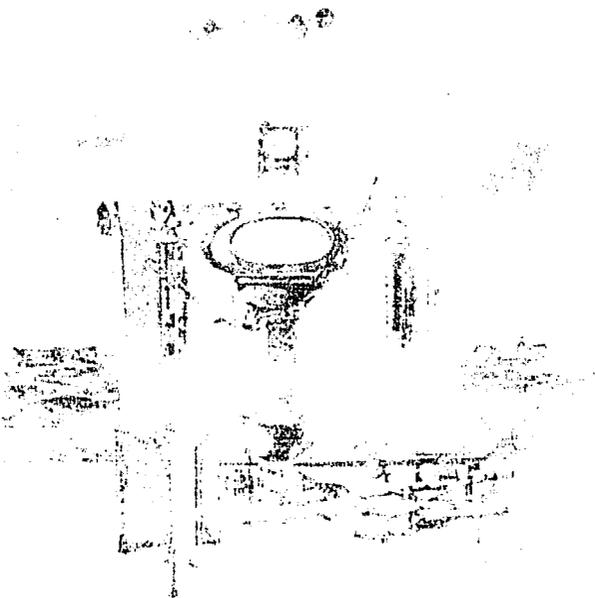
Las imágenes se utilizan para detectar, identificar y dar seguimiento a los fenómenos meteorológicos severos como tormentas, frentes fríos o huracanes. Por medio de las imágenes también se puede estimar la intensidad de la precipitación. Esta información es utilizada por los meteorólogos en la elaboración de sus pronósticos para cada región del país.

La información más útil referente al viento se puede obtener de cualquiera de las estaciones meteorológicas y climatológicas del SMN. En las estaciones meteorológicas de primer orden la información disponible referente al viento es: Frecuencia de las distintas direcciones y velocidad media para cada una de ellas; frecuencia o porcentaje de calmas, considerando como tales las veces en las que la velocidad ha sido inferior a 8 km/h; frecuencia en intervalos de velocidad; Recorrido mensual en el intervalo 0-24 y 7-7 h; recorrido medio por día de 0 a 24 y de 7 a 7 h; recorrido medio horario; Recorrido máximo en un día y fecha; dirección y velocidad de la racha máxima, indicando el día la hora y el minuto.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



CAPITULO II: CRITERIOS DE MODELACION DE PARAMETROS EOLICOS.



Día llegará en que, gracias al estudio continuo de muchos siglos, las cosas actualmente ocultas parecerán evidentes, la posteridad se asombrará de qué verdades tan evidentes se nos hayan escapado.

Séneca



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

25

II. Criterios de modelación de parámetros eólicos



A lo largo de los años se han desarrollado diversos criterios para determinar las cargas generadas por el efecto del viento en estructuras; uno de los parámetros de mayor importancia es la variación de la velocidad del viento con la altura.

II.1. Criterio teórico para el cálculo de la velocidad del viento con la altura

Se ha estudiado por muchos años que la velocidad del viento sufre variación respecto a la altura; existen dos grandes criterios para definir matemáticamente esta variación: un modelo tipo exponencial y otro tipo logarítmico.

El modelo exponencial fue propuesto originalmente por Davenport¹² quien dedujo, a partir de una serie de lecturas de la velocidad del viento en las costas de cabo Kennedy, que la velocidad de una corriente de aire en una zona cercana a la superficie de la tierra esta afectada por fuerzas de fricción y obstáculos que impiden el libre flujo del aire, así pues, cuando el aire fluye en zonas muy cercanas a la superficie terrestre la fricción que se genera entre ambos elementos origina fluctuaciones de corta duración denominadas ráfagas las cuales provocan cambios en la intensidad del viento tal y como lo muestra la figura II-1.

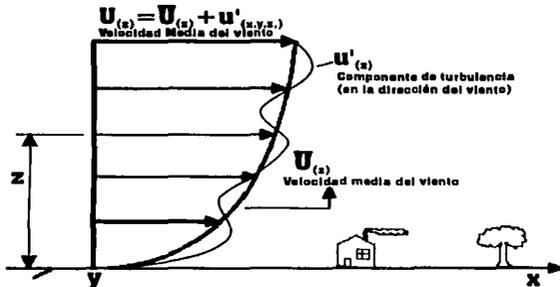


Figura II-1 Simulación de la velocidad del viento a diferentes alturas; la línea más gruesa del perfil representa la componente de la velocidad media, en tanto la línea más delgada simboliza la turbulencia presente en la zona

¹² The Relationship of Wind Structure to Wind Loading, Davenport, A.G., Wind Effects on Buildings and Structures, Proceedings of the Conference held at the National Physical Laboratory, Teddington, London, 1965



II.1 Criterio teórico para el cálculo de la velocidad con la altura

Auxiliándose de anemómetros colocados a distintas alturas, Davenport encontró que algunas de las diferencias más notables en este tipo de corrientes son los cambios en la frecuencia y amplitud de la corriente tal y como se muestra en la figura II-2.

De esta forma Davenport concluyo que la velocidad del viento tiene una variación de acuerdo a una altura de referencia y esta representada mediante la siguiente expresión matemática:

$$U(z) = U_{(z_{ref})} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha$$

Ecuación II-1 Ecuación que describe el perfil exponencial propuesto por Davenport

En donde z , es la altura respecto al terreno a la cual se desea conocer la velocidad; z_{ref} , es una altura de referencia, usualmente de 10 m; $U(z_{ref})$, es la velocidad básica o de referencia en el nivel, y depende de las condiciones del terreno o grado de exposición de la estructura y α , es un exponente en función del grado de exposición de la estructura.

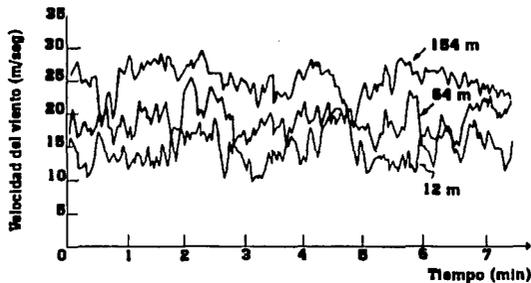


Figura II-2 Registro de velocidades de viento a distintas alturas sobre el nivel del terreno.

A diferencia de la altura z_{ref} , distintos reglamentos mundiales han propuesto valores para el exponente α para distintas zonas de desplante; por ejemplo las Normas Técnicas Complementarias de diseño por viento del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal [Ref. 5], proponen la siguiente modificación a la ecuación II-1

II. Criterios de modelación de parámetros cólicos



$$U(z) = U_{(z_w)} \left(\frac{z}{10} \right)^{2/\alpha}$$

Ecuación II-2 Modificación propuesta por el RCDF-1993 al perfil propuesto por Davenport.

El coeficiente α se define en la tabla II-1; por otro lado la [Ref. 5] establece la misma ecuación base propuesta por Davenport, pero con pequeños ajustes para acoplarla a las condiciones de la Republica Mexicana (en el subcapitulo II-2 se establecen más detalles de dichas modificaciones). Los valores de α mostrados en la tabla II-4 se formularon de acuerdo a la categoría del terreno (tabla II-2) y al grado de seguridad de la estructura según su tamaño (tabla II-3) de acuerdo al criterio del propio reglamento.

ZONA	DESCRIPCIÓN	α
A	Zonas de gran densidad de edificios altos. Por lo menos la mitad de las edificaciones que se encuentren en un radio de 500 m. alrededor de la estructura en estudio tienen una altura superior a 20 m	3.6
B	Zona típica urbana y suburbana. El sitio esta rodeado predominantemente por construcciones de mediana y baja altura o por áreas arboladas y no se cumplen las condiciones del caso A.	4.5
C	Zona de terreno abierto. Poco o nulas obstrucciones al flujo del viento como en campo abierto o en promontorios.	7.0

Tabla II-1 Coeficiente α según RCDF-1993

Una variante de la ley exponencial propuesta por Davenport es la propuesta por G.I. Taylor y O.A. Sutton, en donde se reconoce que las ráfagas no son una serie de impulsos independientes, sino que son una sucesión de movimientos continuamente interconectados. La ecuación que describe este comportamiento tiene la siguiente forma:

$$\bar{\mu} = \mu_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^{\frac{n}{2-n}}$$

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Ecuación II-3 Perfil propuesto por G.I. Taylor y O.A Sutton

En donde μ_0 es una velocidad de referencia a la altura z_0 y $\bar{\mu}$ es la variación de la velocidad promedio sobre un punto de la superficie. El valor de n se establece en función de la



II.1 Criterio teórico para el cálculo de la velocidad con la altura

turbulencia del flujo. Algunos trabajos posteriores basados en la ecuación anterior han propuesto $n=2/7$ (R.H Sherlock), $2/5$ (Pagon) y $1/2.8$ (G.F. Collins).

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

Tabla II-2 Clasificación de la superficie terrestre de acuerdo a la rugosidad que se presenta en ella, propuesta elaborada por [REF. 5]

CLASE	DESCRIPCIÓN
A	Todo elemento de recubrimiento de fachada, de ventanearías y de techumbres y sus respectivos sujetadores. Todo elemento estructural aislado, expuesto directamente a la acción del viento. Asimismo, todas las construcciones cuya mayor dimensión, ya sea horizontal o vertical, sea menor que 20 metros
B	Todas las construcciones cuya mayor dimensión, ya sea horizontal o vertical, varíe entre 20 y 50 metros.
C	Todas las construcciones cuya mayor dimensión, ya sea horizontal o vertical, sea mayor que 50 metros

Tabla II-3 Clasificación de las edificaciones de acuerdo a las dimensiones que se presentan en ella, propuesta elaborada por [REF. 5]

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



CATEGORÍA DEL TERRENO ¹³	α CLASE DE LA ESTRUCTURA ¹⁴		
	A	B	C
1	0.099	0.101	0.105
2	0.128	0.131	0.138
3	0.156	0.160	0.171
4	0.170	0.177	0.193

Tabla II-4 Coeficiente α según [REF. 5]

Algunos años después que Davenport propuso la ley exponencial para describir el comportamiento de la velocidad del viento en la parte baja de la atmósfera, surgió una alternativa a la ley propuesta por Davenport, tomando en cuenta la velocidad gradiente $dU(z)/dz$ que depende del esfuerzo cortante τ_0 , la densidad del aire ρ y la altura sobre la cual se desea conocer la velocidad media. A partir de un análisis dimensional, se formula una ecuación diferencial para obtener la velocidad media del viento de acuerdo a un perfil logarítmico (Ecuación II-4).

$$U(z) = \mu^* \frac{1}{k} \ln \frac{z}{z_0}$$

Ecuación II-4 Modelo matemático que describe el comportamiento de la variación de la velocidad del viento de acuerdo a un perfil logarítmico.

Donde μ^* es la fricción que ejerce la velocidad del viento sobre la superficie del terreno sobre la cual se desplaza.¹⁵

$$\mu^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Ecuación II-5 Fricción que ejerce la velocidad del viento con la superficie del terreno.

¹³ La categoría del terreno a la que hace referencia la CFE, se describe más detalladamente en la tabla numero A-1 de las ayudas de diseño.

¹⁴ La clase de la estructura a la que hace referencia la CFE, se describe más detalladamente en la tabla numero A-2 de las ayudas de diseño.

¹⁵ Los valores de μ^* en el caso vientos extremos son del orden de 1 a 2 m/seg



II.1 Criterio teórico para el cálculo de la velocidad con la altura

k es la constante de Von Káman equivalente a 0.40 y z_0 es la llamada longitud de rugosidad, estimada a partir de mediciones experimentales; algunos valores de este parámetro se muestran en la tabla II-5.

<i>TIPO DE TERRENO</i>	<i>LONGITUD DE RUGOSIDAD z_0</i>
HIELO PLANO	0.00001
MAR ABIERTO	0.00010
COSTA	0.00100
TERRENO ABIERTO CON POCa VEGETACIÓN Y CASAS	0.01000
AREA DE AGRICULTURA CON POCAS CASAS	0.05000
PUEBLOS Y SUBURBIOS	0.30000
URBANAS	1.00000

Tabla II-5 Coeficiente Z_0 según la Engineering Science Data Units (ESDU)

Este criterio ha sido adaptado por algunos reglamentos; por ejemplo el Eurocódigo 1 usa el criterio logarítmico para determinar la velocidad media hasta alturas de 200 m por encima de la superficie del terreno; esta norma ha considerado 4 diferentes tipos de terreno y ha incluido un factor K_t proporcional al producto del coeficiente μ^2 y de la constante de Von Káman k . De esta forma la ecuación II-4 queda de la siguiente forma:

$$U(z) = U_{\text{bas}} K_t \ln \frac{z}{z_0} \quad \text{si } z_{(\text{min})} \leq z \leq 200 \text{ m}$$

$$U(z) = U_{z_{\text{min}}} \quad \text{si } z < z_{(\text{min})}$$

Ecuación II-6 Modificación propuesta por el Eurocódigo 1 al Perfil propuesto por el ESDU.

Donde K_t es un factor de terreno y $z_{(\text{min})}$, es la altura a la cual se considera constante la velocidad del viento

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II. Criterios de modelación de parámetros eólicos



CATEGORÍA	TIPO DE TERRENO	K_T	LONGITUD DE RUGOSIDAD Z_0	$Z_{(min)}$
I	Terrenos abiertos, superficies lisas como océanos o lagos	0.17	0.01	2.00
II	Zonas boscosas o con poca densidad de casas	0.19	0.05	4.00
II	Zonas industriales, suburbanas o con una gran densidad de árboles	0.22	0.30	8.00
IV	Zonas urbanas con al menos el 15 % de su superficie cubierta por edificaciones mayores a los 15 m	0.24	1.00	16.00

Tabla II-6 Coeficiente Z_0 , k_t , y Z_{min} según el Eurocódigo 1

El gráfico de la figura II-3 muestra un resumen del comportamiento de la velocidad del viento a lo ancho de la atmósfera terrestre, de acuerdo a las rugosidades establecidas por los criterios logarítmico y exponencial respectivamente.

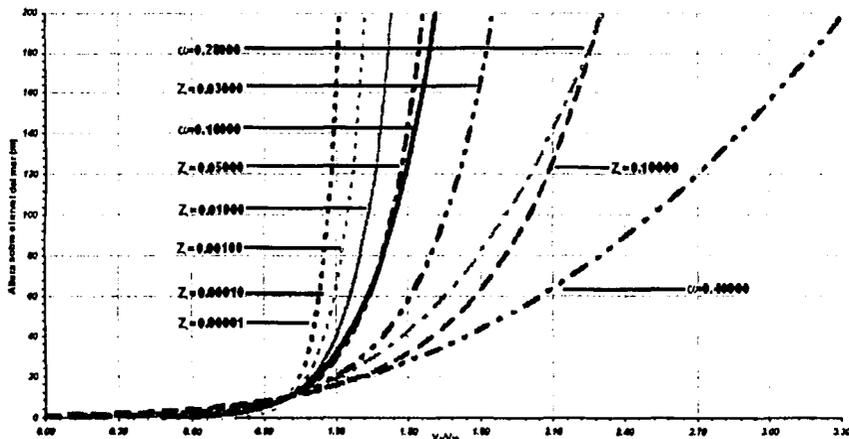


Figura II-3 Variación de la velocidad del viento de acuerdo a rugosidades propuestas por el ESDU y Davenport.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



II.2. Influencia de la rugosidad y otros parámetros

Los principales factores que contribuyen a establecer la variación de un flujo de aire sobre una determinada zona de la superficie terrestre son causados esencialmente por cambios en el contenido energético del viento.

En la figura II-4, se muestra la variación de la velocidad del viento durante un periodo de tiempo; en el primer caso figura (a), las variaciones del registro de velocidades tienen amplitudes pequeñas, mientras que en el segundo caso, figura (b), la amplitud de las variaciones es mucho mayor, sin embargo el valor de la velocidad media, que se registra en el segundo caso es menor que la registrada en el primer caso; estas diferencias se atribuyen a la rugosidad que presenta cada tipo de terreno.

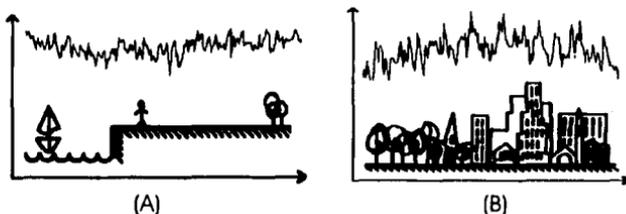


Figura II-4 Variación de la velocidad del viento durante un periodo de tiempo, la figura (a) muestra variaciones del registro de velocidades en amplitudes pequeñas, mientras que en el segundo caso, figura (b) la amplitud de las variación es mayor; estas diferencias se atribuyen a la rugosidad que presenta cada tipo de terreno

En general el incremento de magnitud al que corresponderá exactamente cada fluctuación no solo dependerá de las características de rugosidad de la superficie, pues esta también se vera afectada por el número de obstáculos presentes en cada sitio (factor de topografía), las condiciones climáticas de la localidad (factores de presión, densidad y temperatura) y por los efectos característicos que se generan en cada zona por la posición geográfica del sitio (Fuerza de Coriolis).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II. Criterios de modelación de parámetros eólicos



Así entonces, cada uno de los códigos de diseño existentes en la actualidad, decretan sus propios parámetros para corregir la velocidad del viento por la influencia de cada uno los agentes anteriores.

En nuestro país, la Comisión Federal de Electricidad ha distinguido características de rugosidad y topografía para diferentes localidades con el afán de mejorar los diseños estructurales de algunas de las edificaciones expuestas al viento.

La CFE propone un factor de rugosidad f_r que define la velocidad del viento respecto a una altura, z tomando en cuenta de la categoría del terreno (tabla II-2) y la clase de la estructura según su tamaño (tabla II-3). La expresión propuesta por la CFE es:

Si $z \leq 10$	Si $10 < z \leq \delta$	Si $z > \delta$
$F_{rz} = 1.56 \left[\frac{10}{\delta} \right]^\alpha$	$F_{rz} = 1.56 \left[\frac{z}{\delta} \right]^\alpha$	$F_{rz} = 1.56$
(A)	(B)	(C)

Ecuación II-7 Expresión propuesta por [Ref. 5], para estimar la variación de la velocidad del viento con la altura.

Donde

δ , es la altura gradiente en metros.

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

Los coeficientes α y δ son función de la rugosidad del terreno y del tamaño de la construcción; en la siguiente tabla se muestran los valores de δ que recomienda la CFE en su manual de diseño por viento.

El valor correspondiente para el coeficiente α se define en la tabla II-4 [Ref. 5]

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



CATEGORÍA DEL TERRENO ^a	δ
1	245
2	315
3	390
4	455

Tabla II-7 Coeficiente δ según [Ref. 5].

La [Ref. 5] establece un factor de topografía F_t , el cual toma en cuenta el efecto de la topografía del sitio de desplante de la estructura. En la tabla II-8 se muestran los valores propuestos del factor F_t .

SITIOS	TOPOGRAFÍA	F_t
PROTEGIDOS	Base de promontorios y faldas de serranías del lado de sotavento	0.8
	Valles cerrados	0.9
NORMALES	Terreno prácticamente plano, campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menores que 5 %	1
	Terrenos inclinados con pendientes entre 5 y 10 %, valles abiertos y litorales planos	1.1
EXPUESTOS	Cimas de promontorios, colinas o montañas, terrenos con pendientes mayores que 10 %, cañadas cerradas y valles que formen un embudo o cañón, islas.	1.2

Tabla II-8 Factores de topografía según [Ref. 5]

Otro factor que incluye según la [Ref. 5] es el factor por tamaño F_c , cuyo coeficiente tomó en cuenta el tiempo en el que la ráfaga del viento actúa de manera efectiva sobre una construcción de dimensiones dadas. Considerando la clasificación de la edificación según sus dimensiones (tabla II-3), se proponen los siguientes valores para este factor.

CLASE DE LA ESTRUCTURA	F_c
A	245
B	315
C	390

Tabla II-9 Coeficiente F_c según [REF. 5].

¹⁶ La categoría del terreno a la que hace referencia la CFE, se describe más detalladamente en la tabla número A-1 de las ayudas de diseño del manual de diseño por viento.

II. Criterios de modelación de parámetros eólicos



Además de los factores anteriores, la [Ref. 5] establece la ecuación II-8 para corregir los cambios por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar.

$$\rho(z) = \rho(0) \frac{0.392\Omega}{273 + \tau}$$

Ecuación II-8 Ecuación que establece el cambio de la densidad del aire para una altura de referencia, propuesta establecida por la [REF. 5].

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

τ , corresponde a la temperatura ambiental en °C

La tabla II-10 muestra la relación entre los valores de la altitud, n metros sobre el nivel del mar (msnm), y la presión barométrica, Ω .

ALTITUD MSNM	PRESIÓN BAROMÉTRICA MM. DE Hg
0	760
500	720
1000	675
1500	635
2000	600
2500	565
3000	530
3500	495

Tabla II-10 Relación entre la altitud y la presión barométrica, propuesta realizada por la [REF. 5]

II.3. Velocidades de Reynolds

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La naturaleza aleatoria del viento se debe esencialmente al efecto de la fricción causada por la superficie de la tierra en la velocidad del flujo. Estas fluctuaciones a las que se les denomina ráfagas o velocidades de Reynolds, son altamente irregulares y complejas, ya que la variabilidad que presenta la velocidad del viento ocurre dentro de un amplio intervalo de escalas de tiempo, modificándose en una fracción de segundo.



Para exponer en forma genérica la complejidad de este fenómeno supóngase un sistema de coordenadas cartesiano "X,Y,Z" (figura II-5), en donde se ubica un vector representativo de la velocidad del viento $U(t)$ en un instante de tiempo t .



Figura II-5 Componentes de la velocidad del viento en un tiempo t

Si se representa este vector mediante cada una de sus componentes ortogonales $\mu(t)$, $\nu(t)$, $\omega(t)$, se tiene que la magnitud del vector velocidad $U(t)$ estará dada por:

$$|U(t)| = \left[\mu^2(t) + \nu^2(t) + \omega^2(t) \right]^{\frac{1}{2}}$$

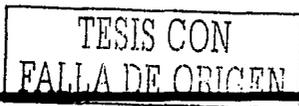
Ecuación II-9 Magnitud vectorial de la velocidad el viento

Al aislar cualquiera de las componentes del vector velocidad y considerando que estas se pueden dividir en dos partes: una dependiente del espacio-tiempo y otra que solo depende de espacio, se tiene que las componentes restantes del vector velocidad están dadas por:

$$\mu(t) = \bar{\mu} + \mu' \quad \nu(t) = \bar{\nu} + \nu' \quad \omega(t) = \bar{\omega} + \omega'$$

Ecuación II-10 Componentes vectoriales de un vector de la velocidad del viento

En donde la primer componente de cada vector corresponderá a la magnitud de la velocidad media del viento \bar{U} , que como ya se ha dicho es independiente del tiempo. Ahora, si la dirección de este vector se relaciona con el sentido positivo del eje X, las componentes del vector



II. Criterios de modelación de parámetros eólicos



ráfaga estarán dados por μ' , en la dirección del viento, ν' , en la dirección transversal al viento y ω' perpendicular a la dirección del viento. Tal y como se muestra en la figura II-6.

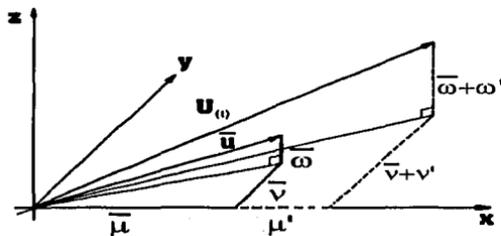


Figura II-6 Componentes de un vector de velocidad del viento.

De esta forma la ecuación II-9 toma la siguiente forma.

$$U(t) = \bar{u} + \left[(\mu')^2 + (\nu')^2 + (\omega')^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación II-11 Descomposición de la velocidad del flujo de viento.

El valor de la derecha de la ecuación II-11 corresponde a la magnitud del vector ráfaga $|V_R(t)|$

Para propósitos de diseño estructural, donde no existen fenómenos de inestabilidad aerodinámica, se considera únicamente el parámetro de turbulencia en el sentido de la velocidad media $\bar{\mu}$, pues se ha observado que la desviación estándar de la turbulencia $\sigma(\mu')$ es equivalente a tres veces la desviación estándar de la turbulencia en la dirección transversal al viento $\sigma(\mu') \approx 3\sigma(\nu')$ y, ésta última es mucho mayor que la que corresponde a la dirección perpendicular al flujo de aire $\sigma(\mu') \gg \sigma(\omega')$.

II.4. Propiedades dinámicas de las ráfagas

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



II.4 Propiedades dinámicas de las ráfagas

Debido a que la turbulencia es un factor importante en la respuesta de la estructura ante la acción del viento, a continuación, se expone brevemente algunos conceptos asociados a la descripción matemática de las propiedades dinámicas de las ráfagas.

Una medida de la energía total que presentan las fluctuaciones del flujo de aire es referida a una razón matemática denominada índice de turbulencia la cual se representa por el cociente:

$$I_z = \frac{\sigma(V_R)}{\bar{V}_z}$$

Ecuación II-12 Relación para definir el índice de turbulencia a una altura z

Donde $\sigma(V_R)$, es la desviación estándar de la velocidad de Reynolds y \bar{V}_z , es la velocidad media del viento a la altura de referencia.

El índice de la turbulencia también varía con el tipo de terreno. Davenport propuso los valores de la tabla II-11 para una altura de 10 m al considerar tres tipos de terreno diferentes.

	TIPO DE TERRENO	I_z
A	<i>Terrenos abiertos con pocos obstáculos, terrenos con pastos o agrícolas con pocos árboles, praderas, costas, islas, lagos interiores, desiertos.</i>	0.180
B	<i>Terrenos uniformemente cubiertos con obstáculos de 30-50 pies de altura: suburbios residenciales, pequeños pueblos, bosques, pequeños campos con árboles y arbustos.</i>	0.320
C	<i>Terrenos con grandes e irregulares objetos. Centros de grandes ciudades, campos con árboles muy grandes, etc.</i>	0.580

Tabla II-11 Índice de turbulencia para una altura de 10 metros sobre el nivel del terreno propuesto por Davenport

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II. Criterios de modelación de parámetros edáficos



Actualmente los valores propuestos por Davenport han caído un poco en el desuso, debido a que otros autores han propuesto mejoras significativas al modelo propuesto por Davenport; por ejemplo Harris propone la siguiente ecuación:

$$I_z = \frac{\sigma(v)}{v_z} = 2.58k^{1/2} \left(\frac{10}{z} \right)^\alpha$$

Ecuación II-13 Relación propuesta por Harris que describe la variación del Índice de turbulencia con la altura Z sobre el nivel del terreno

Donde $\sigma(v)$, es la desviación estándar de la velocidad del viento, v_z es la velocidad del viento a la altura z , k es el factor de rugosidad del terreno y z es la altura sobre el nivel del terreno.

Los coeficientes α y k se calculan de acuerdo a la tabla II-12.

	TIPO DE TERRENO	α	COEFICIENTE DE ARRASTRE K
A	Terrenos abiertos con pocos obstáculos, terrenos con pastos o agrícolas con pocos árboles, praderas, costas, islas, lagos interiores, desiertos.	0.16000	0.00500
B	Terrenos uniformemente cubiertos con obstáculos de 30-50 pies de altura: suburbios residenciales, pequeños pueblos, bosques, pequeños campos con árboles y arbustos.	0.28000	0.01500
C	Terrenos con grandes e irregulares objetos. Centros de grandes ciudades, campos con árboles muy grandes, etc.	0.40000	0.05000

Tabla II-12 Coeficientes α y k propuestos por Harris para calcular el índice de turbulencia

Con el criterio logarítmico el "Engineering Sciences Data Unit (ESDU)", propone la siguiente ecuación para calcular el índice de turbulencia:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



$$I_v = \frac{7.5\eta \left[0.538 + 0.09 \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right]^{\eta^4}}{\left[1 + 0.156 \ln \left(\frac{\mu^*}{C_r z_0} \right) 2.5 \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right]}$$

Ecuación II-14 Relación propuesta por el ESDU que describe la variación del índice de turbulencia con la altura z sobre el nivel del terreno

Donde:

$$v_z = 2.5\mu^* \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

$$\mu^* = \frac{v_{10}}{2.5 \ln \left(\frac{z_{10}}{z_0} \right)}$$

$$\eta = 1 - \frac{z}{z_G}$$

$$z_G = \frac{\mu^*}{6C_r}$$

$$C_r = 2\Omega \sin \phi$$

Los valores correspondientes para Z_0 se exponen en la tabla II-5. μ^* es la velocidad de fricción; v_z es la velocidad media del viento a la altura z , C_r es el parámetro de Coriolis; Ω es la latitud del sitio; Z_G corresponden a la altura gradiente de la zona y η es un factor de corrección por altura.

Las Figuras II-7 a II-10, describen la variación de los índices de turbulencia para algunas ciudades de la Republica Mexicana¹⁷. En total se analizaron 25 ciudades distribuidas a lo largo de la costa de la Republica Mexicana tal y como lo muestra la figura II-11. El total de graficas se publican en el Anexo A¹⁸.

Comentarios a los resultados obtenidos

La figura II-7 muestra, la variación del índice de turbulencia de acuerdo a las tres condiciones de terreno establecidas por Harris. Se observa que para terrenos ubicados en la zona "A" (Tabla II-11.), el índice es menor que para un terreno ubicado en una zona "B" ó "C". Esto

¹⁷ Las ecuaciones tanto del ESDU como la de Harris fueron deducidas a partir de vientos medios horarios.

¹⁸ CD-ROM SYPRE by Paris Reyes Aguilar.

II. Criterios de modelación de parámetros eólicos



quiere decir que a menor densidad de obstrucciones en el terreno el índice de turbulencia decrece, dicho de otra forma entre más obstrucciones existan en la superficie del terreno las fluctuaciones presentes en un flujo de aire específico aumentaran

Cosa semejante sucede con las graficas II-8 a II-10 salvo que la variación que se presenta entre estas graficas es específica para cada una de las localidades analizadas. Esto debido a que el algoritmo empleado por el criterio logarítmico, considera factores específicos de los sitios de análisis. Como es la posición geográfica del sitio de desplante de la estructura y la velocidad del viento que se presenta en la zona, solo por mencionar algunos.

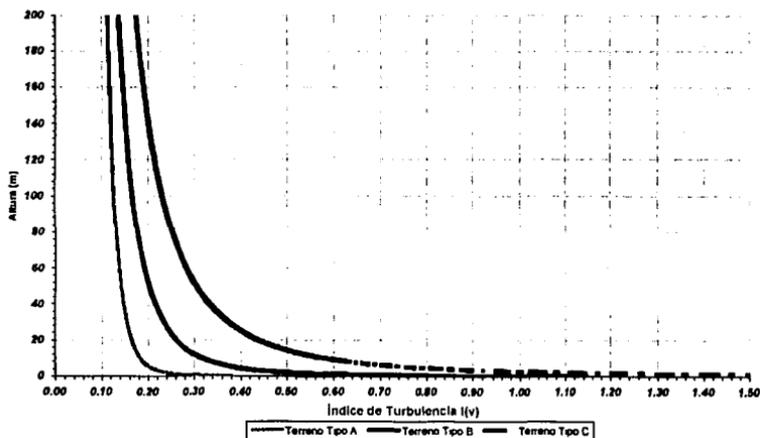


Figura II-7 Variación del Indices de turbulencia para cada tipo de terreno de acuerdo al Criterio Exponencial propuesto por Harris

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

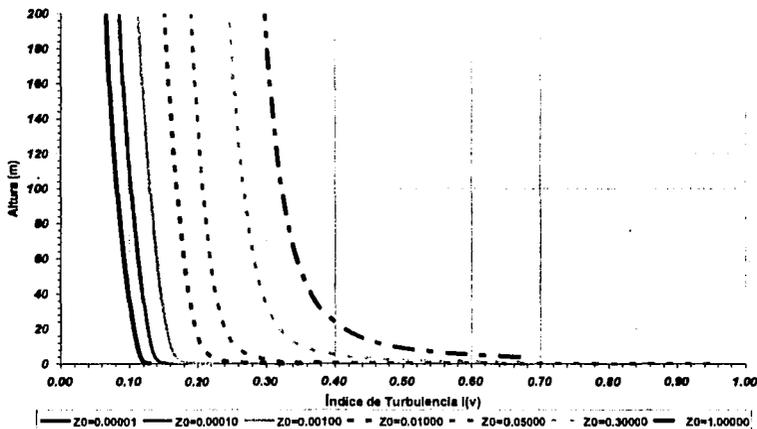


Figura II-8 Variación del índices de turbulencia de acuerdo al Criterio Logartmico propuesto por el ESDU (Estación Ensenada, Baja California Norte)

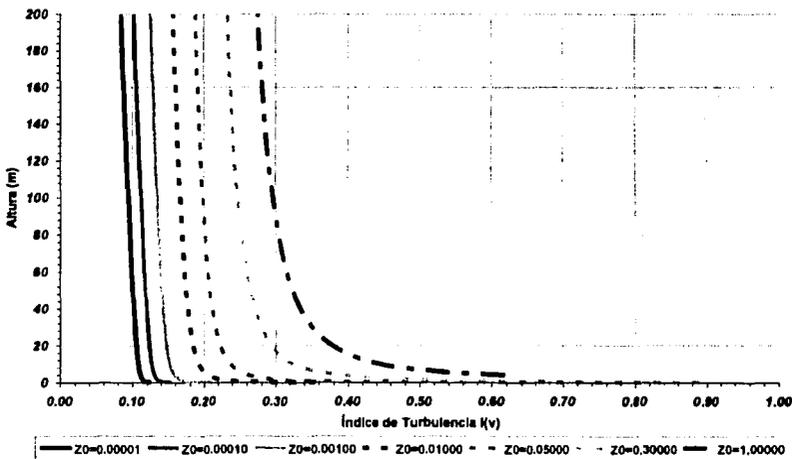


Figura II-9 Variación de los índices de turbulencia de acuerdo a las rugosidades propuestas por el ESDU (Estación Tapachula, Chiapas)

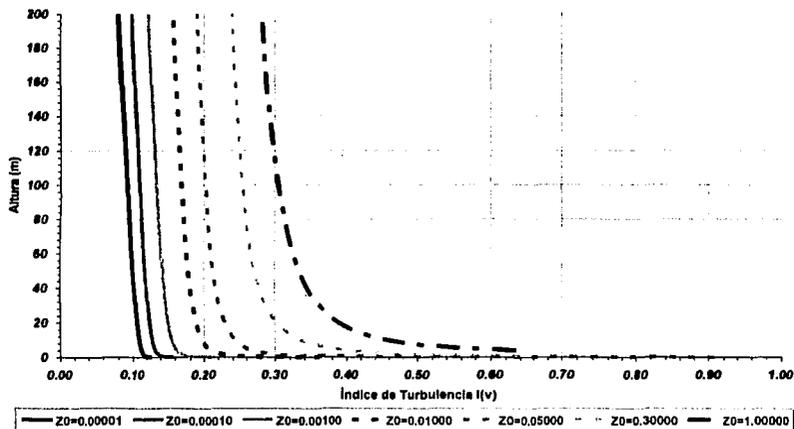


Figura II-10 Variación de los índices de turbulencia de acuerdo a las rugosidades propuestas por el ESDU (Estación Coatzacoalcos, Veracruz)



Figura II-11 Ubicación de estaciones meteorológicas analizadas en este trabajo

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



II.4 Propiedades dinámicas de las ráfagas

Una herramienta matemática para describir las propiedades dinámicas de los flujos de viento y el contenido de energía asociado a las ráfagas, es el espectro de potencia; se han hecho innumerables experimentos a nivel mundial para proporcionar una expresión representativa del espectro de potencia. Por ejemplo, Davenport, obtuvo que para vientos intensos el espectro de la componente longitudinal del viento, se puede reducir a una curva simple ajustable a una expresión algebraica que contiene como parámetros la velocidad media del viento a 10 m de altura sobre del terreno y el coeficiente de arrastre superficial K .

Es común normalizar el espectro de potencia de la siguiente forma:

$$\frac{\bar{f}S(f)}{K\bar{V}_{10}^2}$$

Ecuación II-15 Espectro normalizado de potencia

Donde $\bar{f} = \frac{f\zeta}{v_{10}}$; ζ es una longitud característica cuyo valor se sugiere igual a 1200 m y f equivale a la frecuencia de la ráfaga.

Los espectros de potencia comúnmente utilizados en la literatura son los siguientes:

- a) El espectro propuesto por Davenport

$$\frac{\bar{f}S(f)}{K\bar{V}_{10}^2} = \frac{4\bar{f}^2}{(1 + \bar{f}^2)^4}$$

Ecuación II-16 Espectro de potencia propuesto por A. G. Davenport

- b) Una expresión modificada de la anterior, es la propuesta por Harris

$$\frac{\bar{f}S(f)}{K\bar{V}_{10}^2} = \frac{4\bar{f}}{(1 + \bar{f}^2)^{5/6}}$$

Ecuación II-17 Espectro de potencia propuesto por Harris

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II. Criterios de modelación de parámetros cólicos



Que corresponde a la fórmula propuesta por Von Karman para turbulencia en túnel de viento, con un valor sugerido de 1800 m para la escala de longitud ζ .

c) Espectro de potencia propuesto por Simiu

Se proponen dos expresiones distintas para el espectro, una válida para la zona de altas frecuencias, y la otra válida para la zona de bajas frecuencias.

$$\frac{\bar{f}S(f, z)}{\mu^{*2}} = \frac{4\bar{f}}{(1 + \bar{f}^2)^{4/3}}$$

Ecuación II-18 Espectro de potencia propuesto por Simiu para altas frecuencias

$$\frac{\bar{f}S(f, z)}{\mu^{*2}} = \frac{200\bar{f}}{(1 + \bar{f}^2)^{5/3}}$$

Ecuación II-19 Espectro de potencia propuesto por Simiu para bajas frecuencias

El valor de $\bar{f} = \frac{f_z}{v(z)}$ y μ^* , está dado por la ecuación II-5.

Las expresiones II-16 y II-17 son independientes de la altura sobre el terreno, mientras que las expresiones propuestas por Simiu hacen depender a la densidad espectral de la altura.

Otro criterio más actualizado es el propuesto por el *Engineering Science Data Unit (ESDU)* quien ha establecido un método alternativo a la propuesta matemática de Davenport, obteniendo una ecuación Logarítmica mucho más aproximada a la fórmula de Von Karman para flujos homogéneos e isotrópicos.

$$fS_v(z; f) = A \left[\frac{L_v f}{V_z} \right]^{-2/3} \sigma_v^2$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Ecuación II-20 Espectro de potencia propuesto por el Engineering Science Data Unit



Los valores de cada una de las constantes de esta expresión están dados en la ecuación II-21.

21.

$$A = 0.115 \left[1 + 0.315 \left(1 - \frac{z}{z_G} \right)^6 \right]^{2/3}$$

$$\sigma_v = \frac{\mu^* 7.5 \eta \left[0.538 + 0.09 \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right]^{\eta^{\mu^*}}}{\left[1 + 0.156 \ln \left(\frac{\mu^*}{C_r z_0} \right) \right]}$$

$$L_v = \frac{A^{3/2} \left(\frac{\sigma_v}{\mu^*} \right)^3 z}{2.5 K_z^{3/2} \left(1 - \frac{z}{z_G} \right)^2 \left(1 + 5.75 \frac{z}{z_G} \right)}$$

$$K_z = 0.19 - (0.19 - K_0) e^{-\beta \left(\frac{z}{z_0} \right)^{\mu^*}}$$

$$K_0 = \frac{0.39}{R_0^{0.11}}$$

$$B = 24 R_0^{0.155}$$

$$N = 1.24 R_0^{0.008}$$

$$R_0 = \frac{\mu^*}{C_r z_0}$$

Ecuación II-21 Parámetros propuestos por el ESDU para calcular la variación del espectro de potencia (Las expresiones faltantes se definen unos párrafos atrás)

El espectro de potencia describe el contenido de frecuencias de las velocidades de ráfagas, y la distribución de energía asociada a cada frecuencia. Así, un espectro de densidad de potencia describe las componentes periódicas del movimiento aleatorio del viento, en un punto del espacio y a cualquier altura sobre el terreno.

Las Figuras II-12 a II-17, describen la variación de los espectros de potencia para algunas ciudades de la República Mexicana, de acuerdo a los criterios exponencial y logarítmico.

El total de las gráficas de los espectros de potencia de las 25 ciudades analizadas a lo largo de las costa de la República Mexicana (ver figura II-11), se exponen en el Anexo B¹⁹.

Comentarios a los resultados obtenidos

¹⁹ CD-ROM SYPRE by Paris Reyes Aguilar

II. Criterios de modelación de parámetros eólicos



En estas graficas apreciamos que los espectros de potencia calculados a partir del algoritmo propuesto por R.I. Harris, presenta una tendencia cóncava en cada una de sus curvas con un punto de inflexión a una frecuencia particular en la cual la curva se vuelve convexa. En tanto los gráficos obtenidos con las ecuaciones desarrolladas por el ESDU, muestran estas tendencias mediante una sola curvatura de tipo convexa en todos sus casos.

Otro aspecto que se advierte en estos gráficos es el de las escalas que se presentan en el contenido de frecuencias de los espectros, pues en apariencia el espectro establecido con el algoritmo propuesto por el ESDU enmarca un mayor incidencia en el contenido de frecuencias, sin embargo, esto es tan solo una apreciación visual, pues si compara los tabuladores²⁴, utilizados para cada una de las graficas y se establece como parámetro comparativo solo a los cinco primeros tipos de rugosidades propuestas por el criterio logarítmico, se vera que los contenidos de frecuencia no varia tan significativamente e incluso en la mayoría de los casos los obtenidos por el criterio exponencial son un poco mayores. Esto demuestra que el criterio logarítmico tan solo por tener un mayor numero de escalas de turbulencia tiene una aproximación sino más precisa, si más acotada.

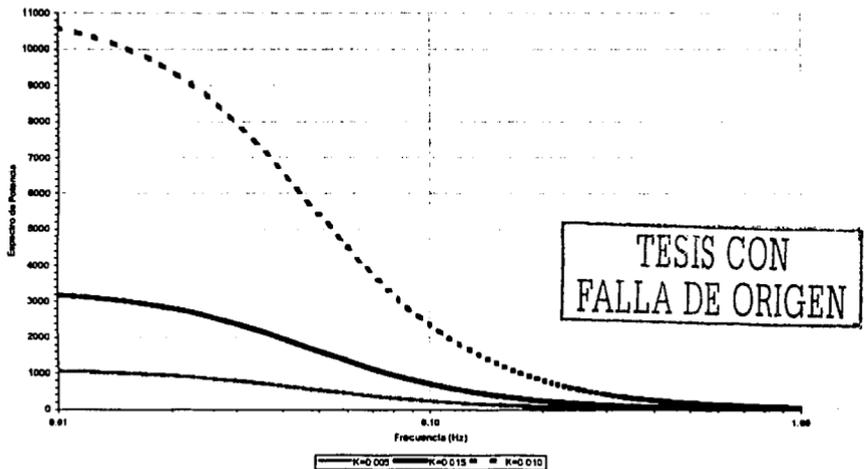


Figura II-12 Espectro de potencia de acuerdo al criterio propuesto por R.I. Harris (Estación Ensenada, Baja California Norte)



II.4 Propiedades dinámicas de las ráfagas

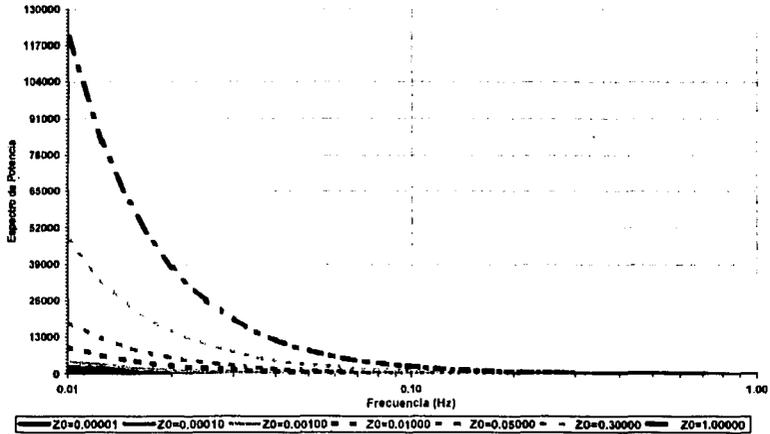


Figura II-13 Espectro de potencia de acuerdo al criterio propuesto por el ESDU (Estación Ensenada, Baja California Norte)

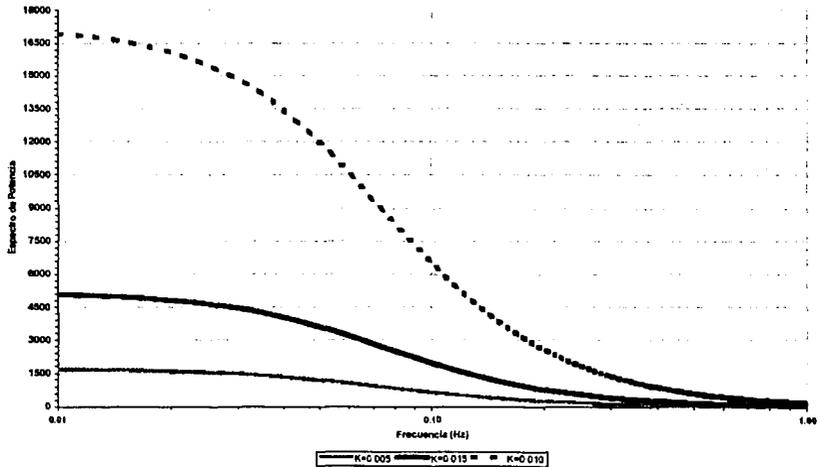


Figura II-14 Espectro de potencia de acuerdo al criterio propuesto por R.I. Harris (Estación Tapachula, Chiapas)

II. Criterios de modelación de parámetros sísmicos

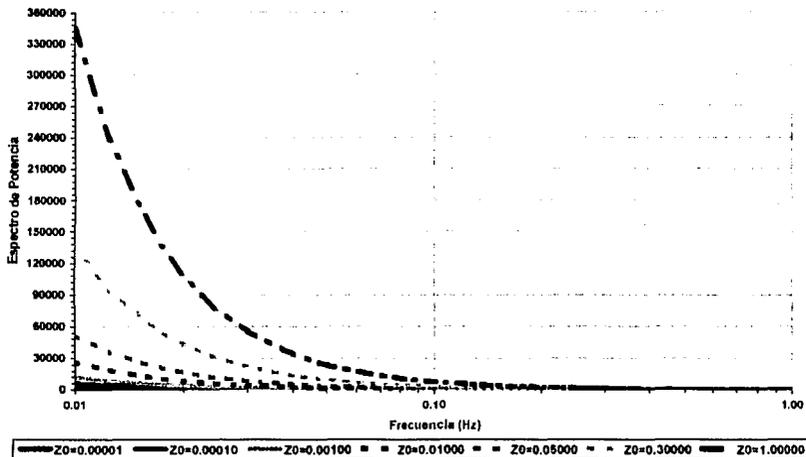


Figura II-15 Espectro de potencia de acuerdo al criterio propuesto por el ESDU (Estación Tapachula, Chiapas)

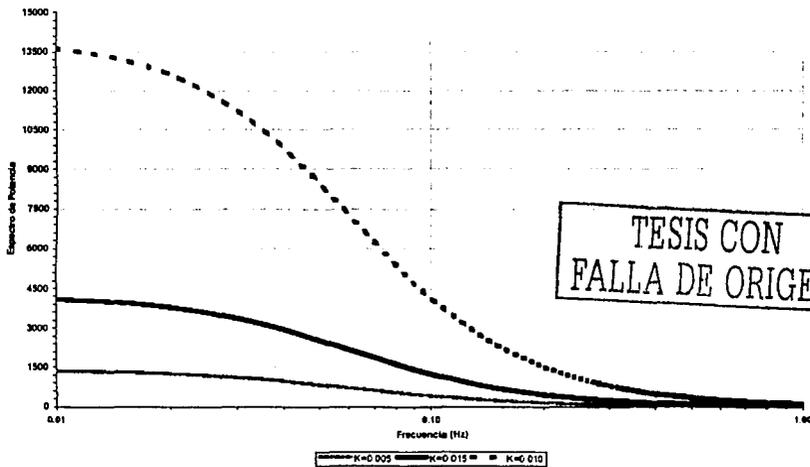


Figura II-16 Espectro de potencia de acuerdo al criterio propuesto por R.I. Harris (Estación Coatzacoalcos, Veracruz)

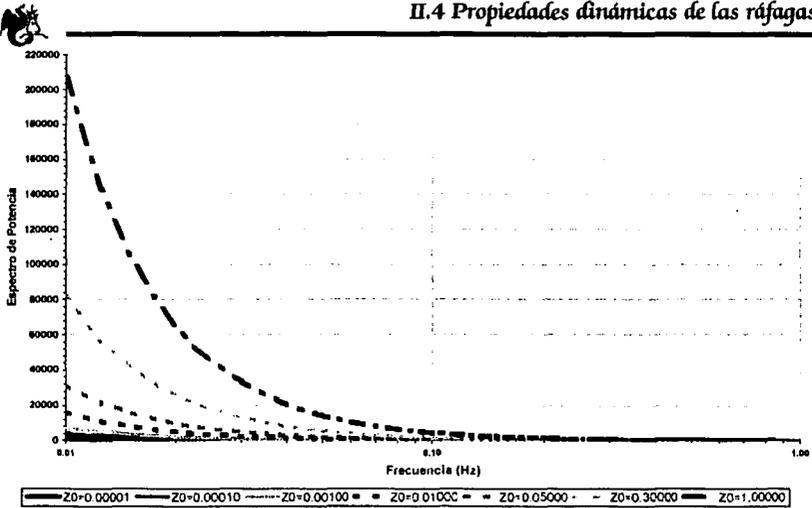
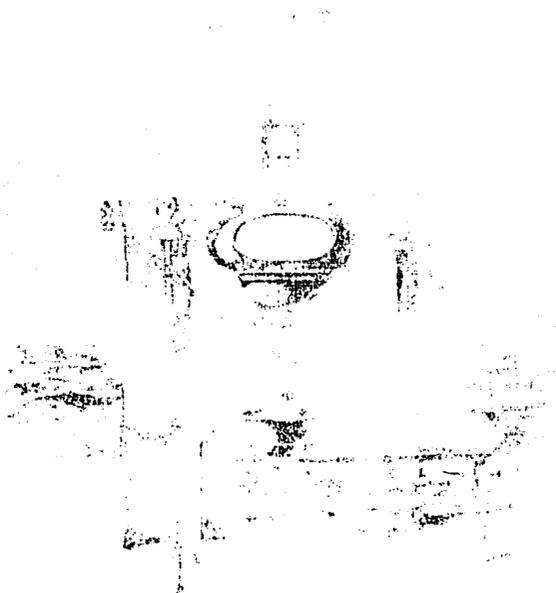


Figura II-17 Espectro de potencia de acuerdo al criterio propuesto por el ESDU (Estación Coatzacoalcos, Veracruz)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

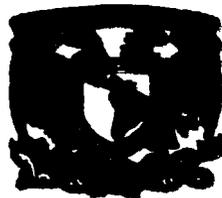


CAPITULO III: VIBRACIONES ALEATORIAS.



Bien sabíamos que eran muy peligrosos los mares en que nos aventurábamos, y que solo teníamos una probabilidad sobre diez de salir vivos; y no obstante, nos hemos arriesgado, a causa de lo que esperábamos ganar, haciendo enmudecer el temor de los peligros probables

Shakespeare, Enrique IV



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Los movimientos atmosféricos a pesar de obedecer a leyes físicas, no pueden predecirse con exactitud, pues existen variables estocásticas que afectan sus intensidades. Para el presente capítulo, las nociones básicas de la teoría de vibraciones aleatorias se vuelven necesarias para exponer la naturaleza estocástica del comportamiento.

III.1. Definición básica de funciones estocásticas

Al aplicar un modelo matemático que describe un determinado fenómeno de la naturaleza, es indispensable emplear herramientas teóricas que incluyan aspectos estocásticos o probabilísticos.

Existen casos en los que, los valores futuros solo pueden ser descritos en términos de una distribución de probabilidades, tal y como es el caso de la turbulencia del viento. La imposibilidad de obtener un modelo determinista que permita conocer con exactitud el comportamiento futuro de las series estadísticas, es debido a que dichas series están caracterizadas por la presencia de muchos factores aleatorios. No obstante, es posible obtener un modelo para calcular la probabilidad de un valor futuro con tendencia hacia determinados límites. Estos son los modelos estocásticos o más conocidos como procesos estocásticos.

La palabra *estocástica* es sinónima de aleatorio y se dice que un proceso estocástico está formado por un conjunto de series temporales representadas por una colección indexada de variables aleatorias; ahora, una variable aleatoria puede ser representada por X puesto que se refiere a una única característica de interés medible en el tiempo, por ejemplo, el número de accidentes semanales en una carretera, la deflexión de una estructura bajo la acción del viento, la tensión de una pared acuática bajo la acción de una ola o incluso la cantidad anual de gas consumido en un hogar. En una experiencia bidimensional, por ejemplo la identificación de unos individuos a través de su peso y su estatura, la realización se efectuaría solo sí al escoger un individuo al azar se miden en él ambos parámetros, de esta forma, la realización se vuelve una pareja de números del tipo (X_1, X_2) . En una experiencia n-dimensional se tendría análogamente vectores aleatorios de la forma (X_1, X_2, \dots, X_n) y, siguiendo con la analogía, en una variable



III.1 Definición básica de funciones estocásticas

aleatoria multidimensional, denotada por $\{X_t\}$, se encuentra que el subíndice t puede tomar infinitos valores de un conjunto \mathcal{E} cuya dimensión puede ser infinita.

Por el momento, se asume que la acción es descrita por una sola variable X_t , la cual es en función del tiempo. El proceso es probado bajo un intervalo razonable como se muestra en la figura III-1. Se asume que el intervalo de tiempo es lo suficientemente largo para que las funciones características importantes de la señal $\{X_t\}$, estén dentro del periodo de tiempo asumido; una vez fijado un valor en el tiempo, $t=t_i$, el proceso estocástico pasa a ser una variable aleatoria, X_{t_i} , que tendrá su correspondiente distribución de probabilidad: $F(X_{t_i})$. Si en lugar de un valor, se fijan dos valores del tiempo, se obtendría una variable bidimensional con una función de distribución bivalente. Así, para $t=t_i$ y $t=t_j$ la distribución de probabilidad sería $F[X_{t_i}, X_{t_j}]$. En general, para un conjunto finito de valores del tiempo, t_1, t_2, \dots, t_N , se obtiene una función de distribución conjunta.

$$F[X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_n}]$$

Ecuación III-1 Función de probabilidad que representa un conjunto finito de valores

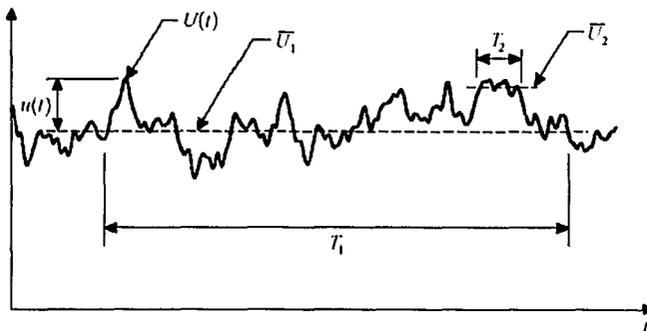


Figura III-1 Representación gráfica de una variable aleatoria (en este caso X está representada por la velocidad del viento u) durante un lapso de tiempo t

III. Vibraciones aleatorias



Teniendo presente lo anterior, se dice que un proceso estocástico está perfectamente caracterizado cuando se pueden determinar las funciones de distribución conjunta para cada conjunto finito de variables del proceso, es decir, para cada N en la ecuación III.1.

$$F[X_t | g]$$

Ecuación III-2 Función de probabilidad que representa un proceso estocástico

No obstante, hay que indicar que no se exige que exista una determinada relación entre las distribuciones de probabilidad de las variables aleatorias correspondientes a cada subconjunto de períodos, por lo que puede haber procesos estocásticos de muchas clases, según sean dichas relaciones.

Ahora bien, dado que $F[X_t]g$ representa un proceso estocástico, entonces $\{X_t\}$ es un proceso estocástico de parámetros continuos si el conjunto \mathcal{E} es continuo, pero si por el contrario \mathcal{E} es discreto, por ejemplo N , se tiene un proceso estocástico de parámetro discreto. El parámetro t suele tener una interpretación temporal, continua o discreta. Por su parte, la variable X también puede ser discreta o continua, lo cual conduce a cuatro tipos de procesos estocásticos:

	<i>T DISCRETO</i>	<i>T CONTINUO</i>
<i>X DISCRETO</i>	Proceso estocástico discreto de variables discretas (Unidades producidas mensualmente de un producto determinado)	Proceso estocástico continuo de variables discretas. (Producción hasta el instante t)
<i>X CONTINUO</i>	Proceso estocástico discreto de variables continuas. (Toneladas de producción diaria de un producto)	Proceso estocástico continuo de variables continuas. (Velocidad de un vehículo en el instante t)

Tabla III-1 Tipos de procesos estocásticos que existen dentro de la naturaleza

En resumen, cualquier proceso en el que se involucren probabilidades que transcurran en el tiempo será un proceso estocástico.

III.2. Respuesta de sistemas dinámicos bajo excitaciones aleatorias

El viento al igual que otros fenómenos de la naturaleza, es uno de los más importantes en la generación de efectos dinámicos en las estructuras. Para estimar la respuesta de sistemas



III.2 Respuesta de sistemas dinámicos bajo excitaciones aleatorias

estructurales bajo la excitación dinámica de una corriente de aire se requiere no solo una descripción completa de las propiedades de las ráfagas, sino también conocer las propiedades dinámicas básicas de la estructura, como la rigidez, el periodo o frecuencia de vibración, el tipo de cimentación, el amortiguamiento, etc.

Para muchas estructuras, la respuesta dinámica bajo la acción del viento puede calcularse con razonable exactitud, asumiendo que se tiene un sistema de un solo grado de libertad, como el de la figura. III-2



Figura III-2 Estructura de 1 grado de libertad, bajo una fuerza de viento $F(t)$

Considerando el sistema con masa m , apoyado en un resorte elástico de rigidez k en paralelo con un amortiguador viscoso de coeficiente Cs , se modela el movimiento mediante la siguiente ecuación de equilibrio dinámico:

$$F_{tot} = m\ddot{\xi} + Cs\dot{\xi} + k\xi$$

Ecuación III-3 Ecuación de movimiento para un edificio con 1 grado de libertad

Donde $\{\xi\}$, $\{\dot{\xi}\}$ y $\{\ddot{\xi}\}$ son: el desplazamiento, velocidad y aceleración, respectivas del sistema después de aplicar el vector de fuerzas F_{tot} el cual es dependiente del tiempo.

Si establecemos que la fuerza que produce una corriente de viento específica, esta descrita por la ecuación III-4, en la cual se deduce que la carga F_{tot} se calcula a partir de la velocidad relativa del viento $(U+w)$ y su relación con la velocidad de la estructura. $\dot{\xi}$.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III. Vibraciones aleatorias



Ahora debido a que la velocidad media del viento U es en la mayoría de los casos mucho mayor que los valores numéricos de los componentes longitudinales de turbulencia u y la velocidad de la estructura ξ . Se establece que el trinomio de la ecuación III-4 es equivalente a la ecuación II-5.

Sustituyendo el parámetro situado a la derecha de la igualdad en la ecuación III-4 y a su vez igualando esta con la ecuación de movimiento III-3, se tendrá que la carga total del viento esta representada por tres componentes: una carga debida a la velocidad media F_q , una carga fluctuante F_i , causada por la turbulencia y una fuerza producida por el amortiguamiento aerodinámico F_a , de la estructura (Ecuación. III-6).

$$F_{tot} = C_D A \frac{1}{2} \rho (U + u - \xi)^2$$

Ecuación III-4 Deducción del valor de la carga del viento sobre una superficie

$$(U + u - \xi)^2 = U^2 + 2Uu - 2U\xi$$

Ecuación III-5 Simplificación que solo considera los efectos de la velocidad media del viento

$$F_q = C_D A \frac{1}{2} \rho U^2$$

$$F_i = C_D A \rho U u$$

$$F_a = C_D A \rho U \xi$$

$$F_{tot} = C_D A \frac{1}{2} \rho U^2 + C_D A \rho U u - C_D A \rho U \xi$$

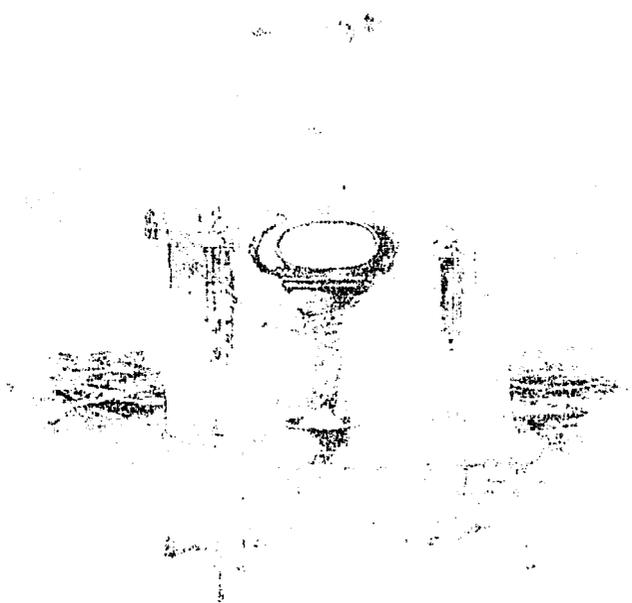
Ecuación III-6 Componentes de la carga producida por la acción del viento sobre una estructura

Donde C_D es el coeficiente de arrastre; A es el área de la estructura perpendicular a la dirección media del viento, ρ es la densidad del aire, U es la velocidad media del viento y u corresponde a la componente de ráfaga.

En la tesis, para el desarrollo para la obtención de desplazamientos únicamente se considera los dos primeros parámetros de la ecuación y se despreciará la componente de amortiguamiento dinámico F_a .

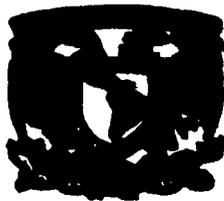


CAPITULO IV: FENOMENOS DE INTERACCIÓN ESTATICA Y DINAMICA.



La mayoría de las ideas fundamentales de la ciencia son esencialmente sencillas y, por regla general pueden ser expresadas en un lenguaje comprensible para todos.

Einstein, Albert.



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



El viento es un fenómeno de tipo dinámico, con variaciones de tipo aleatorio. En esencia, debería aplicarse metodologías de análisis estructural de tipo dinámico. Sin embargo, para estructuras poco sensibles a los efectos del viento, se puede considerar una aproximación de tipo estática. Los reglamentos a nivel mundial, consideran ambas posibilidades.

A continuación se expondrán brevemente las consideraciones básicas de los diseños estáticos y dinámicos del viento en estructuras.

IV.1. Aproximación estática

El término *aproximación estática*, se emplea, para describir un método analítico, mediante el cual, la fuerza causada por el viento se considera constante; es decir, los efectos del viento se traducen a una presión que actúa en forma invariante o estáticamente perpendicular a una superficie expuesta en particular.

A partir de las ecuaciones de Bernoulli, la presión que ejerce el viento en una superficie viene dada por:

$$p_0 = \frac{1}{2} \rho U^2$$

Ecuación IV-1 Presión directa de un fluido en una superficie a partir de la ecuación de Bernoulli

Donde p_0 es la presión estática del flujo, ρ es la densidad del aire y U^2 la velocidad media del flujo.

En nuestros días, los códigos más contemporáneos para la obtención de la presión estática producida por el viento suelen incluir factores que toman en cuenta la forma geométrica de la estructura, su altura y la topografía del sitio de desplantes, entre otros problemas específicos a los cuales se encuentre expuesta la estructura. Por ejemplo, la [Ref. 20], propone que la presión



estática del viento debe ser afectada por las condiciones de exposición y altura de la estructura, tal y como lo muestra la ecuación IV-2.

$$P = C_p C_z K p_0$$

Ecuación IV-2 Presión estática producida por la velocidad media del viento de acuerdo al RCDF-1993

Donde p_0 es la presión básica de diseño igual a 30 kg/m^2 ²⁰ para estructuras comunes y a 35 kg/m^2 para aquellas clasificadas como del grupo A^{21} ; K es un factor correctivo debido a las condiciones de exposición del predio en que se ubica la construcción, y se fija según la tabla IV-1; C_z , es otro factor correctivo que es función de la altura sobre la cual se encuentra la zona en exposición; este factor se calcula mediante la ecuación IV-3; C_p , es un factor de presión cuya valor esta en función de la forma de la construcción y la posición de la superficie expuesta; la [Ref. 20], clasifica a las construcciones según lo dispuesto por la tabla IV-2.

$$C_z = \left(\frac{z}{10} \right)^a$$

Ecuación IV-3 Factor correctivo según la altura sobre la cual se encuentra la zona expuesta. Los valores de a se muestran en la tabla IV-1

Para calcular la fuerza total en una estructura la presión calculada con la ecuación IV-2 se multiplica por el área expuesta a los efectos del viento. Esta área debe ser siempre la proyectada en dirección normal a la dirección del flujo de aire.

La [Ref. 5], a diferencia de la [Ref. 20] propone la ecuación IV-4 para determinar las cargas estáticas producidas por la acción del viento.

$$F_e = P_s A_s$$

Ecuación IV-4 Presión estática producida por la velocidad media del viento de acuerdo a la [REF. 5]

²⁰ Este valor se ajusta considerando una velocidad regional igual a 80 km/hr y un coeficiente de presión igual a 1

²¹ Esta clasificación se realiza de acuerdo al artículo 174 del título sexto del RCDF-1993

IV. Fenómenos de interacción estática y dinámica



Esta ecuación establece que la fuerza del viento que actúa perpendicularmente a la superficie de un elemento de la construcción F_n , es equivalente a la presión de diseño a la altura z , por el área expuesta de la estructura A . El valor de la presión de diseño p_e se determina mediante el uso de la siguiente expresión:

$$p_z = (p_e - p_i)$$

(a)

$$P_z = P_n$$

(b)

Ecuación IV-5 Presión de diseño según el tipo de superficie. La ecuación a corresponde a estructuras cerradas²², mientras que la b se emplea en general para elementos aislados

Donde p_e y p_i corresponden a las presiones exterior e interior respectivamente y sus valores corresponden a las ecuaciones IV-6A y IV-6B respectivamente.

$$P_e = C_{pe} K_A K_L q_z$$

(a)

$$P_i = C_{pi} q_z$$

(b)

Ecuación IV-6 (a) y (b) representan las presiones estática exterior e interior producida por la velocidad media del viento de acuerdo a la [REF. 5] respectivamente

Donde C_{pe} es el coeficiente de presión exterior; C_{pi} es el coeficiente de presión interior; K_A es el factor de reducción de presión por tamaño de área; K_L es el factor de presión local y q_z es la presión dinámica de base del viento la cual se calcula de acuerdo a la ecuación IV-7²³.

$$q_z = 0.0048GV_D^2$$

Ecuación IV-7 Presión estática producida por la velocidad media del viento de acuerdo a la [REF. 5]

El factor G de la ecuación anterior corresponde a una corrección por temperatura y por altura con respecto al nivel del mar, y V_D es la velocidad de diseño definida por la siguiente ecuación:

²² Una estructura cerrada es la que se compone de muros y techos a una o dos aguas, dispuestos de tal manera que formen una construcción prismática.

²³ Los valores de los factores C_{pe} , C_{pi} , K_A y K_L se describen en la secciones 4.8.2.2 a la 4.8.2.5 del manual de diseño por viento de la comisión federal de electricidad.



$$V_D = F_T F_a V_R$$

Ecuación IV-8 Velocidad de diseño del viento de acuerdo a la [REF. 5]

V_R , es la velocidad media de diseño y se calcula de acuerdo a los criterios establecidos en la sección II-1²⁴; la [Ref. 5] define V_R como la velocidad regional, y propone mapas de isotacas regionales correspondientes a periodos de recurrencia de 10, 50 y 200 años; la figura IV-1 muestra uno de estos mapas; F_T y F_a corresponden a un factor de ajuste por efectos de la topografía del sitio y a la influencia de la exposición de la construcción²⁵ respectivamente.

	ZONA DE UBICACIÓN	K	A
A	Zona de gran densidad de 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 tienen altura superior a 20 m.	0.65	3.6
B	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 caso A.	1.0	4.5
C	Zona de terreno abierto. Poco o nulas obstrucciones al flujo del viento. Como en campo abierto o en promontorios.	1.6	7.0

Tabla IV-1 Factores de corrección de la presión de viento por condiciones de exposición

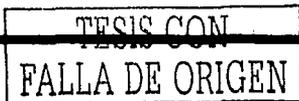
CASO	PRESIONES EXTERIORES	PRESIONES INTERIORES
I	Edificios y construcciones cerradas.	Aberturas principales en la cara de barlovento
II	Paredes aisladas y anuncios	Aberturas principales en la cara de sotavento
III	Estructuras reticulares	Aberturas principales en las caras paralelas a la dirección del viento
IV	Chimeneas, silos y similares	Aberturas uniformemente distribuidas en las cuatro caras.
V	Antenas o torres de sección pequeña.	

Tabla IV-2 Clasificación de los factores de presión según el RCDF-1993²⁶

²⁴ Manual de Obras Civiles Diseño por Viento de la Comisión Federal de Electricidad 1993

²⁵ La determinación de los factores de exposición F_a y de topografía F_T , se definirán en el capítulo II o en los apartados 4.6.3 y 4.6.4 del Manual de Diseño por Viento de la Comisión Federal de Electricidad 1993

²⁶ Para obtener los valores de los factores de presión correspondientes refiérase a las Normas Técnicas Complementarias Diseño por Viento del RCDF 1993 (sección 3.3 y 3.4)



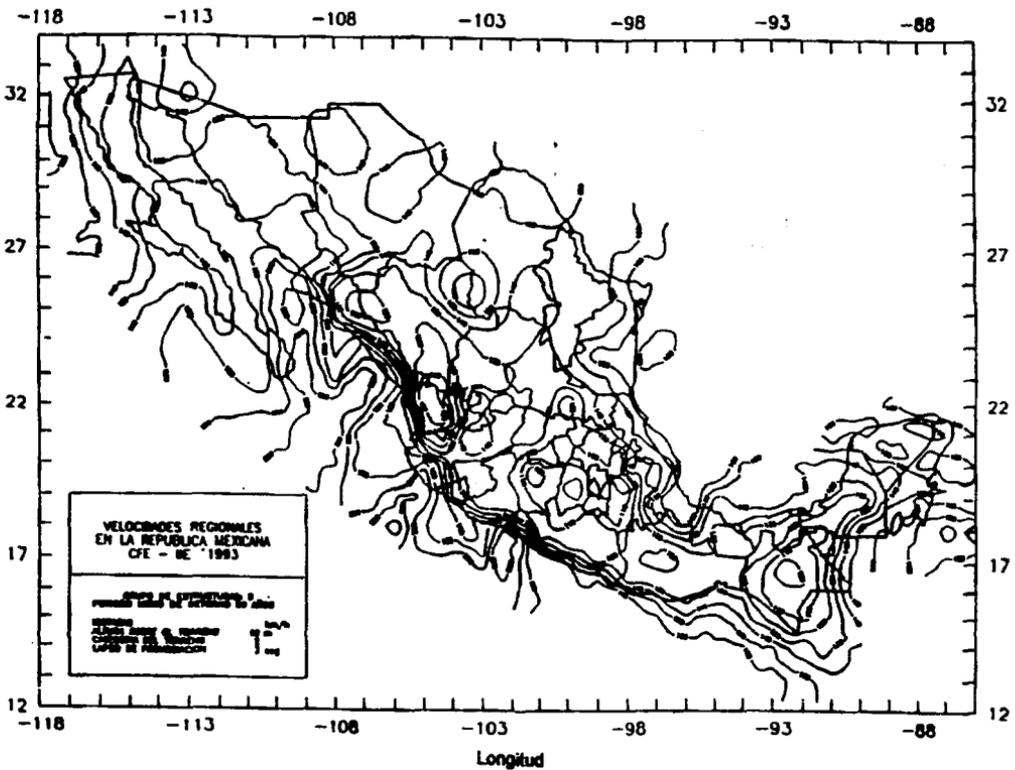


Figura IV-4 Mapa de isotacas para un periodo de retorno de 50 años propuesto por la CFE



Los empujes estáticos se aplican solo en el diseño de estructuras pertenecientes al tipo 1 de acuerdo a la [re. 2] y a la [Ref. 5] (ver tabla IV-3), y que el valor del coeficiente de presión depende de la dirección en la cual se presente la fuerza del viento. La figura IV-2 muestra distribuciones típicas de presiones para una edificación con techos inclinados.

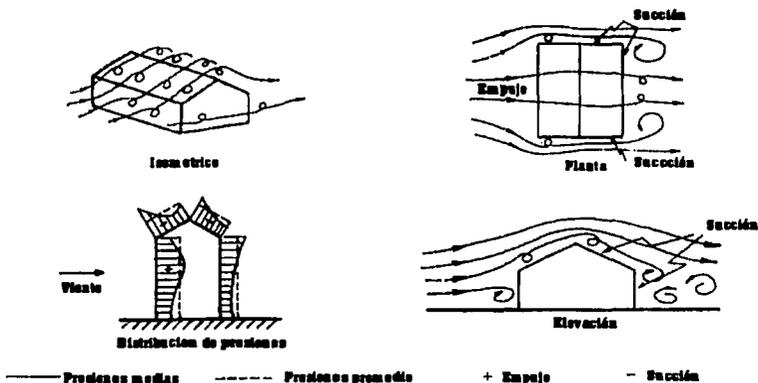


Figura IV-2 Distribución de presiones para un modelo de un edificio en túnel de viento

TIPO	CLASIFICACIÓN
I	Estructuras poco sensibles a las ráfagas y a los efectos dinámicos del viento. Abarca todas aquellas en las que la relación λ (definida como el cociente entre la altura y la menor dimensión en planta), es menor o igual a cinco y cuyo periodo natural de vibración es menor o igual a un segundo (o no excede de 2 en el caso del RCDF).
II	Son estructuras que por su alta relación de aspecto o las dimensiones reducidas de su sección transversal son especialmente sensibles a las ráfagas de corta duración (entre 1 y 5 segundos) y cuyos periodos naturales largos favorecen la ocurrencia de oscilaciones importantes en la dirección del viento, dentro de este tipo se encuentran edificios con una relación de aspecto λ es mayor a 5 o con periodo de vibración mayor que un segundo (2 en el caso del RCDF).
III	Estas estructuras, además de reunir todas las características de las del tipo anterior, presentan oscilaciones importantes transversales al flujo del viento, provocadas por la aparición periódica de vórtices o remolinos con ejes paralelos a la dirección del viento.
IV	Estas son estructuras que por su forma o por lo largo de sus periodos de vibración, presentan problemas aerodinámicos especiales.

Tabla IV-3 Clasificación de las estructuras según su respuesta ante la acción del viento, (criterio establecido por la CFE y el RCDF).



IV.2. Interacción dinámica

La presión estática del viento se calcula a partir de una velocidad de diseño la cual se considera constante. Sin embargo, existe una carga fluctuante que puede generar vibraciones importantes en estructuras sensibles a los efectos dinámicos del viento.

La respuesta dinámica puede estimarse con precisión razonable, si consideramos que durante el intervalo de tiempo $t_i \leq t \leq t_{i+1}$, las fluctuaciones en un flujo que pasa a través de un punto, son causadas por la superposición de las velocidades de Reynolds y la velocidad media del flujo, es decir la ecuación tres del capítulo tres, puede describirse mediante la siguiente función de excitaciones:

$$F_{tot}(\tau) = F_i + \frac{\Delta F_i}{\Delta t_i} \tau$$

Ecuación IV-9 Función de excitaciones

Donde:

$$\Delta F_i = F_{i+1} - F_i$$

Ecuación IV-10 Incremento de fuerza

Y la variable de tiempo τ alterna de 0 a Δt_i



Sustituyendo el valor de F_{tot} de la ecuación III-4 por el valor de la ecuación IV-9 tendremos que la ecuación a resolver para sistemas dinámicos sin amortiguamiento es:

$$m \ddot{\xi} + k \xi = F_i + \frac{\Delta F_i}{\Delta t_i} \tau$$

Ecuación IV-11 Ecuación de movimiento para sistemas expuestos a excitaciones aleatorias

La respuesta $u(\tau)$ en el intervalo de tiempo $0 \leq \tau \leq \Delta t_i$ es la suma de tres partes.



1. La vibración libre debida al desplazamiento inicial ξ_i y a la velocidad $\dot{\xi}_i$, con $\tau=0$
2. La respuesta a la fuerza F_i con las condiciones iniciales igual a cero, y
3. La respuesta al incremento de fuerza $\left(\frac{\Delta F_i}{\Delta t_i}\right)\tau$ con las condiciones iniciales igual a cero.

Adoptando la solución disponible para esto tres casos tenemos:

$$u(\tau) = u_i \cos \omega_i \tau + \frac{\dot{u}_i}{\omega_i} \text{Sen} \omega_i \tau + \frac{F_i}{k} (1 - \cos \omega_i \tau) + \frac{\Delta F_i}{k} \left[\frac{\tau}{\Delta t_i} - \frac{\text{Sen} \omega_i \tau}{\omega_i \Delta t_i} \right]$$

y

$$\frac{\dot{u}(\tau)}{\omega_i} = -u_i \text{Sen} \omega_i \tau + \frac{\dot{u}_i}{\omega_i} \cos \omega_i \tau + \frac{F_i}{k} \text{Sen} \omega_i \tau + \frac{\Delta F_i}{k} \left[\frac{1}{\omega_i \Delta t_i} (1 - \cos \omega_i \tau) \right]$$

Ecuación IV-12

Evaluando estas ecuaciones con $\tau = \Delta t_i$ dado el desplazamiento u_{i+1} y la velocidad \dot{u}_{i+1} con un tiempo $i+1$ la ecuación anterior toma la siguiente forma:

$$u_{(i+1)} = u_i \cos(\omega_i \Delta t_i) + \frac{\dot{u}_i}{\omega_i} \text{Sen}(\omega_i \Delta t_i) + \frac{F_i}{k} [1 - \cos(\omega_i \Delta t_i)] + \frac{\Delta F_i}{k} \left[\frac{1}{\omega_i \Delta t_i} \{ \omega_i \Delta t_i - \text{Sen}(\omega_i \Delta t_i) \} \right]$$

y

$$\frac{\dot{u}_{(i+1)}}{\omega_i} = -u_i \text{Sen}(\omega_i \Delta t_i) + \frac{\dot{u}_i}{\omega_i} \cos(\omega_i \Delta t_i) + \frac{F_i}{k} \text{Sen}(\omega_i \Delta t_i) + \frac{\Delta F_i}{k} \left[\frac{1}{\omega_i \Delta t_i} (1 - \cos(\omega_i \Delta t_i)) \right]$$

Ecuación IV-13

Sustituyendo el valor de Δp_i por la ecuación IV-14 y considerando los efectos del amortiguamiento la ecuación IV-17 puede ser escrita de la siguiente forma:

$$u_{(i+1)} = A u_i + B \dot{u}_i + C F_i + D F_{i+1}$$

y

$$\dot{u}_{(i+1)} = -A' u_i + B' \dot{u}_i + C' F_i + D' F_{i+1}$$

Ecuación IV-14



Ampliando las ecuaciones anteriores a sistemas amortiguados las expresiones para los coeficientes A, B, C, D, A', B', C' y D' dependerán de los parámetros ω_n , k y ζ , y del intervalo de tiempo $\Delta t = \Delta t_i$, y cada uno de estos se calcula de acuerdo a la tabla IV-4 para sistemas con bajo amortiguamiento crítico ($\zeta < 1$). En tanto los parámetros F_i y F_{pi} son factores que establecen la respuesta estructural de la edificación ante una carga de viento $F(t)$, la cual depende del tiempo y se obtiene a partir de las simulaciones espectrales del capítulo VI-2.

COEFICIENTE

$$A = e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \text{Sin}\omega_D\Delta t + \text{Cos}\omega_D\Delta t \right)$$

$$B = e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left(\frac{1}{\omega_D} \text{Sin}\omega_D\Delta t \right)$$

$$C = \frac{1}{k} \left\{ \frac{2\zeta}{\omega_n\Delta t} + e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left[\left(\frac{1-2\zeta^2}{\omega_D\Delta t} - \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \right) \text{Sin}\omega_D\Delta t - \left(1 + \frac{2\zeta}{\omega_n\Delta t} \right) \text{Cos}\omega_D\Delta t \right] \right\}$$

$$D = \frac{1}{k} \left[1 - \frac{2\zeta}{\omega_n\Delta t} + e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left(\frac{2\zeta^2-1}{\omega_D\Delta t} \text{Sin}\omega_D\Delta t + \frac{2\zeta}{\omega_n\Delta t} \text{Cos}\omega_D\Delta t \right) \right]$$

$$A' = e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left(\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} \text{Sin}\omega_D\Delta t \right)$$

$$B' = e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left(\text{Cos}\omega_D\Delta t - \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \text{Sin}\omega_D\Delta t \right)$$

$$C' = \frac{1}{k} \left\{ -\frac{1}{\Delta t} + e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left[\left(\frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} + \frac{\zeta}{\Delta t\sqrt{1-\zeta^2}} \right) \text{Sin}\omega_D\Delta t + \frac{1}{\Delta t} \text{Cos}\omega_D\Delta t \right] \right\}$$

$$D' = \frac{1}{k\Delta t} \left[1 - e^{-\zeta\omega_n\Delta t} \left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \text{Sin}\omega_D\Delta t + \text{Cos}\omega_D\Delta t \right) \right]$$

Tabla IV-4 Coeficientes A, B, C, D, A', B', C' y D'

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



ζ , es el amortiguamiento, ω , es el valor de la frecuencia circular de la estructura, k es el coeficiente de rigidez de la estructura y por ultimo el valor de $\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$

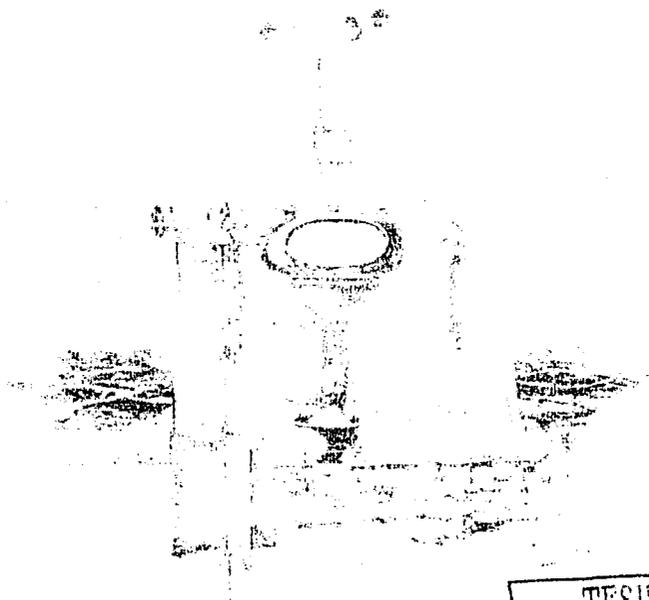
Es importante aclarar que este procedimiento numérico solo es viable para sistemas lineales donde la excitación esta definida por un corto intervalo de tiempo Δt , cuyo valor permite una justa aproximación a la función de excitación.

El capitulo VII describe más a detalle como se obtuvieron cada uno de los datos de la respuesta dinámica.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



CAPITULO V: ANÁLISIS DE REGISTROS DE VIENTO EN ZONAS COSTERAS.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Un conocimiento profundo de las cosas no lo obtendremos ni ahora ni nunca, en tanto no las contemplemos en su crecer desde un principio.

Aristóteles (política)





Las distribuciones de probabilidad de recurrencia de vientos máximos, es una herramienta que se emplea en la mayoría de los países para elaborar mapas de zonificación eólica. En el presente capítulo se ejemplifica la zonificación eólica que la [Ref. 5] estableció para la Republica Mexicana según distintos periodos de retorno. Además se incluye la forma en que se elabora las distribuciones de probabilidad a partir de algunos parámetros estadísticos.

V.1. Zonificación eólica actual

En México, el estudio más detallado de regionalización eólica fue ideado para la elaboración del Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad [Ref. 5]. Donde a partir de velocidades de viento con distintos periodos de recurrencia se elaboran mapas con zonificaciones eólicas para toda la Republica Mexicana.

COSTA	CIUDAD	NUM. OBS.	VELOCIDADES (KM/H)				
			V ₁₀	V ₅₀	V ₁₀₀	V ₅₀₀	V ₁₀₀₀
DEL PACIFICO	ENSENADA	2025	100	148	170	190	247
	ACAPULCO	12002	129	162	172	181	209
	CD. OBREGÓN	26020	147	169	177	186	211
	CULIACÁN	25014	94	118	128	140	165
	LA PAZ	3026	135	171	182	200	227
	MANZANILLO	6018	110	158	177	195	240
	MAZATLÁN	25062	145	213	225	240	227
	PUERTO CORTES	3046	129	155	164	172	196
	SALINA CRUZ	20100	109	126	135	146	182
	TAPACHULA	7164	90	111	121	132	167
DEL GOLFO DE MÉXICO	TEPIC	18039	84	102	108	115	134
	CAMPECHE	4003	98	132	146	159	195
	COATEACOCOS	30027	117	130	137	145	180
	TAMPICO	28110	129	160	177	193	238
	TUXPAN	30190	122	151	161	172	204
	VERACRUZ	30192	150	175	185	194	222
	COZUMEL	23005	124	158	173	185	213
MAR CARIBE	CHETUMAL	23006	119	150	161	180	220
	PROGRESO	31023	103	163	181	198	240

Tabla V-1 Velocidades regionales para las ciudades costeras más importantes de la republica Mexicana, propuestas por la [Ref. 5]

TRABAJO CON
FALLA DE ORIGEN



En este tipo de mapas las velocidades propuestas se refieren a condiciones homogéneas que corresponden a una altura de 10 metros sobre la superficie del suelo, cuya rugosidad será equivalente a la de un terreno plano. Asimismo, la velocidad referida, se asocia a ráfagas de 3 segundos promediadas de acuerdo a los análisis estadísticos de los registros meteorológicos. En la figura 1 del capítulo IV, se muestra uno de estos mapas para un periodo de retorno de 50 años mientras que en la tabla V-1 se presenta un resumen de las velocidades regionales para las ciudades costeras más importantes de la República Mexicana, propuesta por la [Ref. 5].

V.2. Cálculo de parámetros estadísticos básicos

Con la información proporcionada por el SMN, en la base de datos DINUP se determinaron histogramas de velocidades de viento de diversas estaciones (anexo C²⁷). Para el ajuste de los histogramas se empleó la teoría de valores extremos desarrollada por Fisher y Tippett, para ajustar las distribuciones probabilísticas.

Los parámetros estadísticos empleados para construir las distribuciones probabilísticas correspondientes a velocidades de viento²⁸, requieren por lo general del cálculo de la media aritmética de la función y su correspondiente desviación estándar. Las expresiones V-1 a V-2 establecen las ecuaciones matemáticas mediante las cuales se obtendrán los valores representativos para cada uno de los parámetros anteriores.

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{\infty} x f_x(x) dx$$

Ecuación V-1 Media o esperanza matemática

$$\sigma_x = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 f_x(x) dx$$

Ecuación V-2 Desviación estándar

²⁷ CD-ROM SYPRE by Paris Reyes Aguilar

²⁸ Datos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional



Una vez determinada la media y la desviación estándar, se procede a obtener el coeficiente de variación, que relaciona la desviación estándar de la muestra y su respectiva media, ecuación V-3.

$$v_x = \frac{\sigma_x}{\bar{x}}$$

Ecuación V-3 Coeficiente de variación

Establecidas las variables anteriores se procede a obtener un parámetro característico k , cuyo valor es dependiente del coeficiente de variación de la muestra. Para obtener dicho parámetro es necesario elaborar una curva que establezca la variación del parámetro k con el coeficiente de variación, para ello se procede a solucionar el siguiente sistema de ecuaciones, y tabular cada uno de los puntos obtenidos.

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \nu \Gamma(1 - 1/k) \\ 1 + v^2 &= \frac{\Gamma(1 - 2/k)}{\Gamma^2(1 - 1/k)} \end{aligned}$$

Ecuación V-4. Sistema para obtener el parámetro k

En el gráfico V-1, se muestra la variación del parámetro k con el coeficiente de variación, otro parámetro estadístico ν se deduce a partir de la ecuación V-4, la cual es el resultado de una transformación probabilística, elaborada por Fisher y Tippett con el fin de ajustar los valores de la media y la desviación estándar a una distribución probabilística con valores extremos. De esta forma la media, o esperanza matemática, de la variable se define como:

$$\bar{x} = \nu \Gamma\left(1 - \frac{1}{k}\right)$$

Ecuación V-5 Media o esperanza matemática

En tanto la desviación estándar será igual a:

$$\sigma_x = \nu \sqrt{\Gamma\left(1 - \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 - \frac{1}{k}\right)}$$

Ecuación V-6 Desviación estándar





El correspondiente coeficiente de variación será:

$$v_x = \sqrt{\frac{\Gamma(1-2/k)}{\Gamma^2(1-1/k)} - 1}$$

Ecuación V-7 Coeficiente de variación

El valor Γ , representa la probabilidad de una variable aleatoria, distribuida de acuerdo a una función Gamma; ν y κ son parámetros de la función Fisher-Tippett empleados para efectuar el ajuste.

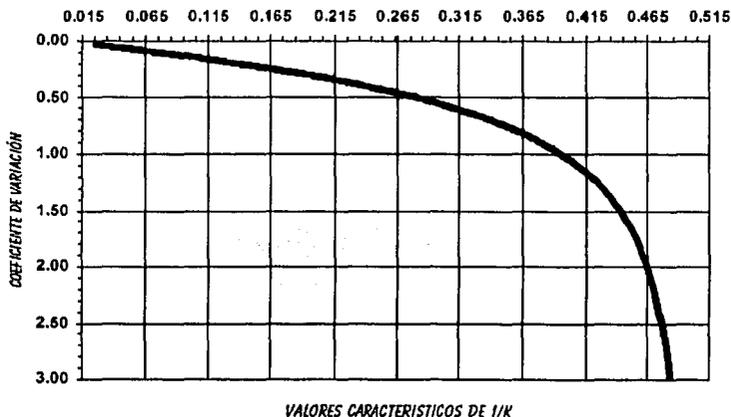


Figura V-1 Curva probabilística, la cual relaciona el coeficiente de variación y el parámetro k de la distribución Fisher-Tippett II

La tabla V-2 muestra los resultados para cada una de las veinticinco estaciones analizadas en este trabajo de tesis.

Los datos a partir de los cuales se obtuvieron las velocidades medias se tomaron de mediciones efectuadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y únicamente se consideraron las velocidades máximas anuales, aunque la tabla muestre el valor de todas las muestras registradas.

V. Análisis de registros de viento en zonas costeras



Los periodos de promediación empleados por el SMN, son para un tiempo de 3 minutos y los anemómetros están ubicados a una altura de 10 m sobre el nivel del terreno cuya rugosidad se considera igual a la de una superficie lisa.

COSTA	CIUDAD	NÚM. DE OBS.	PARÁMETROS ESTADÍSTICOS.				
			\bar{x}	σ_x	v_x	k	D
DEL PACÍFICO	ENSENADA	1522	54.75	24.05	0.4392	3.91	44.3915
	SAN FELIPE	9427	75.79	14.01	0.1848	7.78	69.3521
	LA PAZ	63161	38.98	31.71	0.8134	2.75	27.6140
	LORETO	8708	44.14	30.52	0.6914	2.97	32.4643
	PUERTO CORTES	16916	25.89	23.23	0.8972	2.64	17.9396
	SANTA ROSALÍA	5369	29.45	35.05	1.1899	2.39	19.2219
	CD. OBREGÓN	41052	29.71	20.02	0.6741	3.01	21.9730
	PUERTO PEÑASCO	14645	21.38	23.22	1.0862	2.46	14.2074
	CULIAGÁN	35364	25.19	25.65	1.0182	2.51	16.9703
	MAZATLÁN	26581	70.85	39.36	0.5556	3.36	54.7301
	TEPIC	14695	87.18	16.56	0.1900	7.59	79.5703
	MANZANILLO	33465	32.27	21.03	0.6517	3.07	24.0525
	ACAPULCO	45752	38.03	31.39	0.8255	2.73	26.8460
	PUERTO ÁNGEL	10789	44.71	35.39	0.7915	2.78	31.8747
DEL GOLFO DE MÉXICO	SALINA CRUZ	10294	30.54	33.87	1.1091	2.44	20.2092
	TAPACHULA	23629	85.46	12.23	0.1431	9.78	79.8400
	TAMPICO	18205	76.50	25.05	0.3274	4.84	65.29
	COATZACOALCOS	23177	69.42	30.72	0.4425	3.89	56.2060
	TUAPAN	13411	36.00	31.53	0.8759	2.66	25.0762
MAR CARIBE	VERACRUZ	27031	84.36	16.59	0.1967	7.37	76.7559
	CAMPECHE	137222	58.38	38.96	0.6674	3.03	43.2792
	COZUMEL	31646	27.04	20.63	0.7628	2.83	19.4401
	CHETUMAL	59534	23.54	27.85	1.1834	2.40	15.3774
	F. CARRILLO PUERTO PROGRESO	9257	66.86	26.01	0.3890	4.26	55.4443
		22036	73.71	14.12	0.1916	7.54	67.2309

Tabla V-2 Velocidades regionales para las ciudades costeras más importantes de la república Mexicana, obtenidas a partir de velocidades medias anuales registradas por el SMN

FALLA DE ORIGEN



V.3. Cálculo de distribuciones de probabilidad.

De acuerdo con los criterios expuestos en los capítulos precedentes, y una vez calculados los parámetros básicos que determinan la distribución de probabilidades de la velocidad del viento, se procede a obtener las curvas de probabilidad correspondientes para cada una de las estaciones.

La forma más común de representar dichos eventos es mediante una curva sesgada de distribución generada por la siguiente expresión

$$f(x) = \frac{k}{v} \left(\frac{v}{x}\right)^{k+1} e^{-\left(\frac{v}{x}\right)^k}$$

Ecuación V-8 Distribución de probabilidad Fisher-Tippett tipo II.

La función de probabilidad acumulada queda definida por la ecuación:

$$F(x) = e^{-\left(\frac{v}{x}\right)^k}$$

Ecuación V-9 Distribución de probabilidad acumulada Fisher-Tippett tipo II.

$f(x)$ representa la función de probabilidad de la velocidad del viento x , y $F(x)$ representa la función de probabilidad acumulada de la velocidad del viento x .

Los gráficos V-2 y V-3 muestran ejemplos típicos para cada una de las distribuciones en tanto en el anexo D²⁵. La utilidad práctica de cada una de estas distribuciones es establecer el valor de recurrencia, para una velocidad de viento específica, que para el objetivo del presente bastara con obtener únicamente el valor correspondiente al de la velocidad media, aunque en realidad se debería obtener el valor de recurrencia para cada una de la totalidad de las velocidades del viento que contengan una probabilidad alta de ser presentada durante la vida útil de la

²⁵ CD-ROM *SYPRE* by *París Reyes Aguilar*, se exponen todas las distribuciones de las estaciones analizadas



edificación, sin embargo todo esto hace que el proceso matemático que se elabora mas adelante para la obtención de las curvas de riesgo cólico se complique de manera significativa.

Comentarios a los resultados obtenidos

Esencialmente estas graficas muestran la distribución de probabilidades de la velocidad del viento, de acuerdo a datos registrados por una determinada estación meteorológica y la manera en que se distribuye dicha incidencia del viento depende substancialmente de tres factores, la desviación estándar que existe en la muestra, su correspondiente media y la relación que existe entre ambos factores denominada coeficiente de variación. Pues al analizar cada uno de los datos obtenidos para generar las curvas correspondientes a las 25 estaciones meteorológicas estudiadas, se encuentra que a una desviación estándar menor el sesgo de la curvatura muestra una pendiente muy alta envolviendo el valor de la media poblacional el cual se desplaza generalmente hacia la derecha la velocidad del viento que presenta mayor probabilidad de ocurrencia, dicho desplazamiento depende en su totalidad de coeficiente de variación de la muestra el cual indica que cuando este sea cero la velocidad media del viento presentara la máxima probabilidad de ocurrencia. Ya por ultimo es importante mencionar que cada una de las probabilidades del viento presentes en un determinado flujo es independiente de las condiciones expuestas por cada uno de los criterios de análisis, ya sea el logarítmico y/o el exponencial.

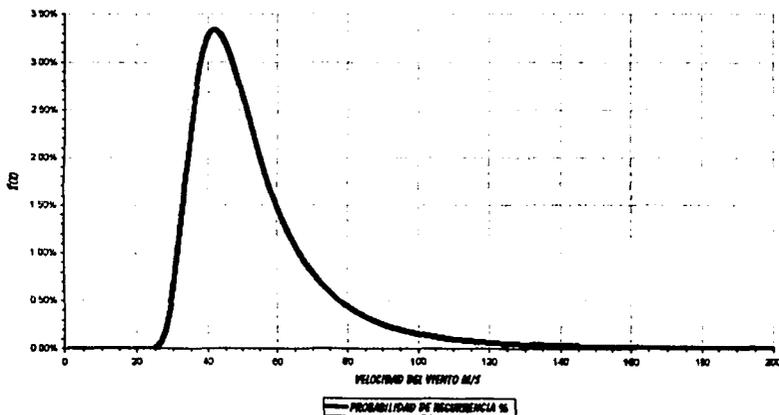


Figura V-2 Distribución de probabilidades (Estación Ensenada, Baja California Norte)



V.3 Cálculo de distribuciones de probabilidad

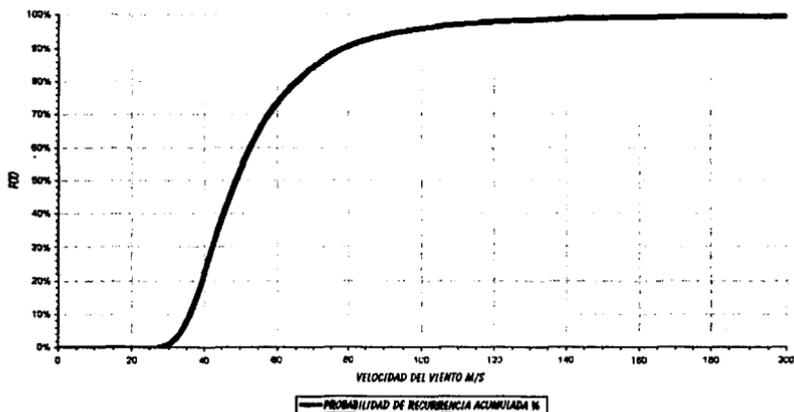


Figura V-3 Distribución de probabilidades acumuladas (Estación Ensenada, Baja California Norte)

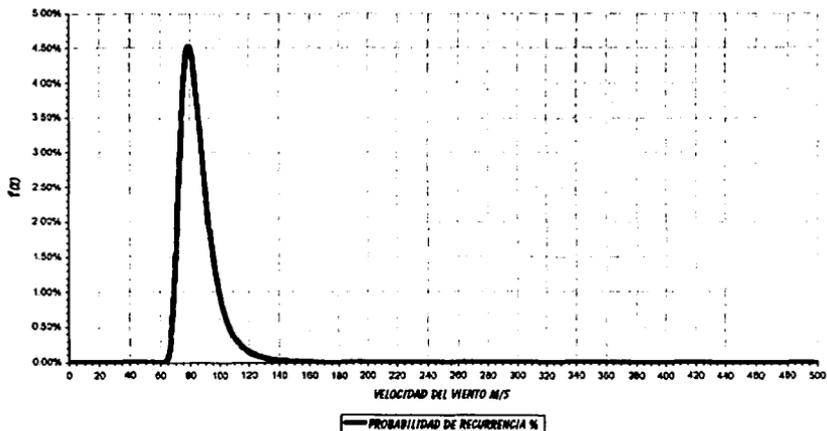


Figura V-4 Distribución de probabilidades (Estación Tapachula, Chiapas)

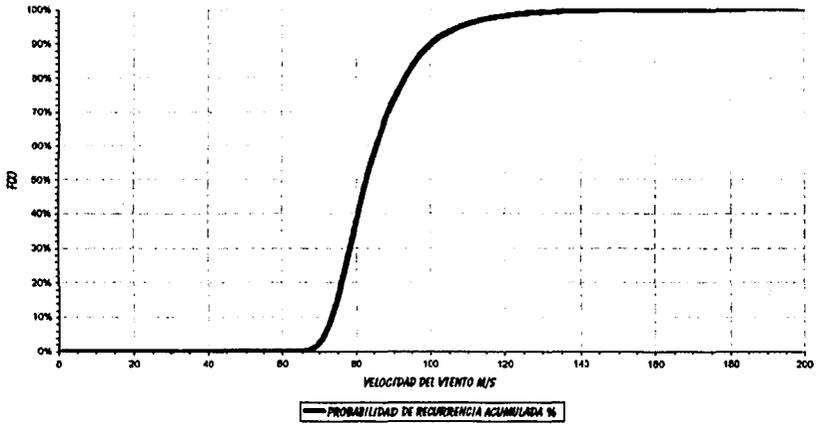


Figura V-5 Distribución de probabilidades acumuladas (Estación Tapachula, Chiapas)

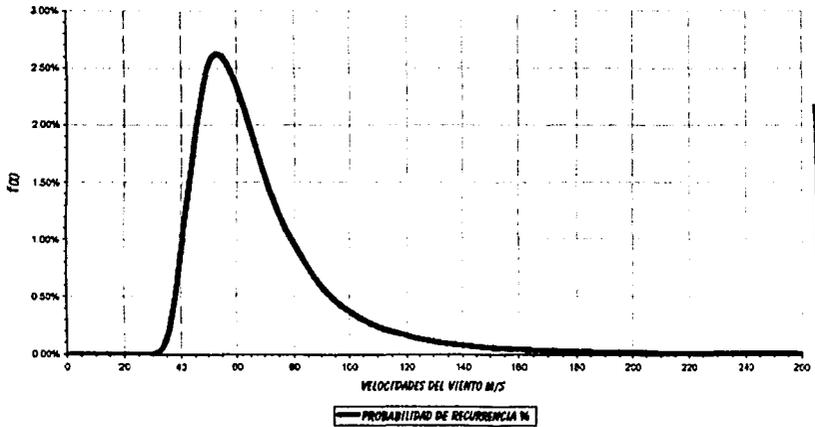


Figura V-6 Distribución de probabilidades (Estación Coatzacoalcos, Veracruz)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

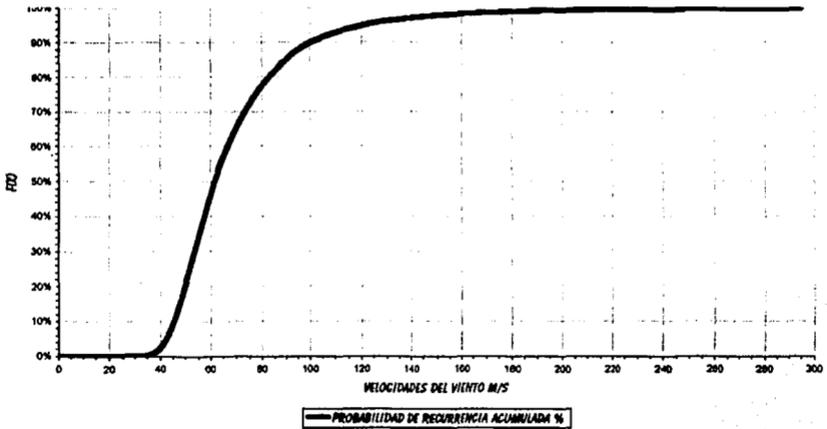


Figura V-7 Distribución de probabilidades acumuladas (Estación Coatzacoalcos, Veracruz)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



**CAPITULO VI:
PROCESOS ESTOCÁSTICOS
APLICADOS A LA INGENIERÍA
EÓLICA.**



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La vida es muy peligrosa, no por las personas que hacen el mal, sino por las que sientan a ver lo que pasa.

Einstein, Albert





Debido a las propiedades aleatorias del flujo de viento, es necesario establecer metodologías de tipo estadístico y dinámico de procesos estocásticos, a fin de evaluar la respuesta estadística de estructuras sujetas a la acción del viento. Inicialmente se proponen un ajuste estadístico de extremos para los datos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional y después se expondrá la metodología de simulación dinámica correspondiente.

VI.1. Determinación de probabilidades de excedencia en registros de viento

Para obtener la probabilidad de excedencia del viento se empleará la un ajuste probabilístico Fisher-Tippett II, mediante la siguiente ecuación:

$$X_q = \upsilon \left[\frac{N}{P_N(X > X_q)} \right]^{1/\kappa}$$

Ecuación VI-1 Probabilidad de excedencias

Los parámetros κ y υ se desprenden de lo dispuesto en el subcapítulo V-2, N es equivalente al período de retorno para el cual se desea conocer la probabilidad de excedencia y $P_N(X > X_q)$, es la probabilidad, para que la velocidad del viento X_q sobrepase a la velocidad X.

Los períodos de retorno y las probabilidades que se utilizarán en este trabajo se muestran en la tabla VI-1.

N	P_N						
1	0.500	0.200	0.100	0.050	0.020	0.010	0.005
10	0.500	0.200	0.100	0.050	0.020	0.010	0.005
25	0.500	0.200	0.100	0.050	0.020	0.010	0.005
50	0.500	0.200	0.100	0.050	0.020	0.010	0.005

Tabla VI-1 Periodos de retorno y probabilidades de excedencia





VI.1 Determinación de probabilidades de excedencia

Las figuras VI-1 a VI-3 muestran ejemplos de la probabilidad de excedencias para los datos característicos algunas de las 25 estaciones analizadas en las costas de la Republica Mexicana. Las gráficas restantes se muestran en el anexo E³⁰

Comentarios a los resultados obtenidos

Podemos observar a simple vista que en estas graficas para un periodo de retorno mayor, la probabilidad de que una velocidad de viento X_p sobrepase a la velocidad media del viento X es significativamente mayor.

También podemos observar que la escala de velocidades de excedencia varia en proporción a la los parámetros estadísticos ν y k descritos en el capítulo anterior. Además también se aprecia que para velocidades de viento superiores al valor de la media estadística, la probabilidad de excedencia es significativamente pequeña en comparación con velocidades de viento por debajo de la media.

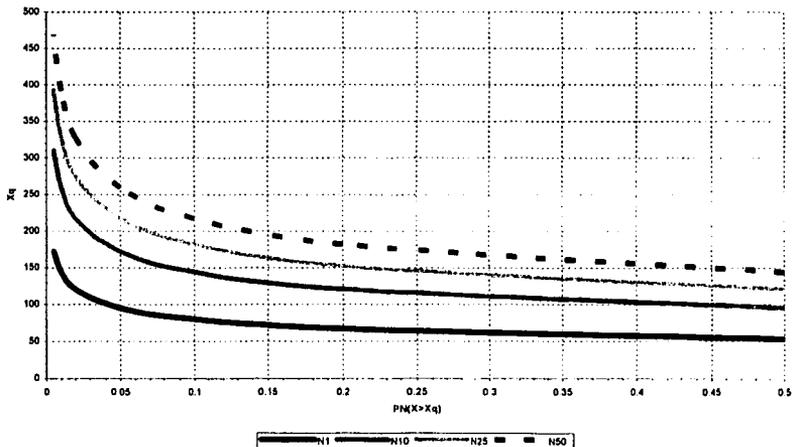


Figura VI-1 Probabilidad de excedencias, Estación Ensenada, Baja California Sur

³⁰ CD-ROM SYPRE by Paris Reyes Aguilar.

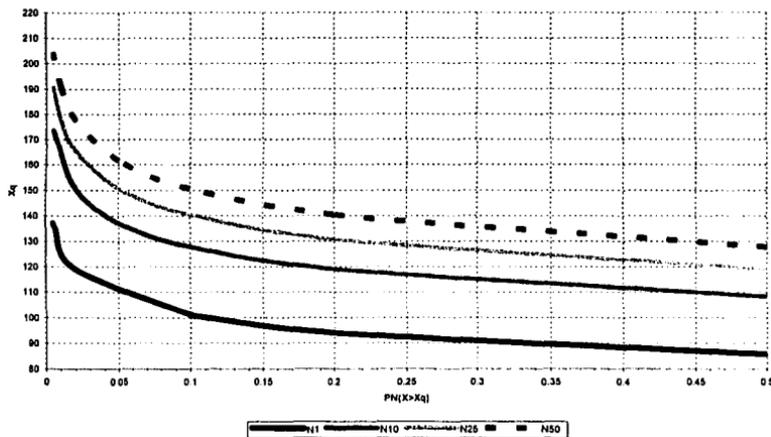


Figura VI-2 Probabilidad de excedencias, Estación Tapachula, Chiapas

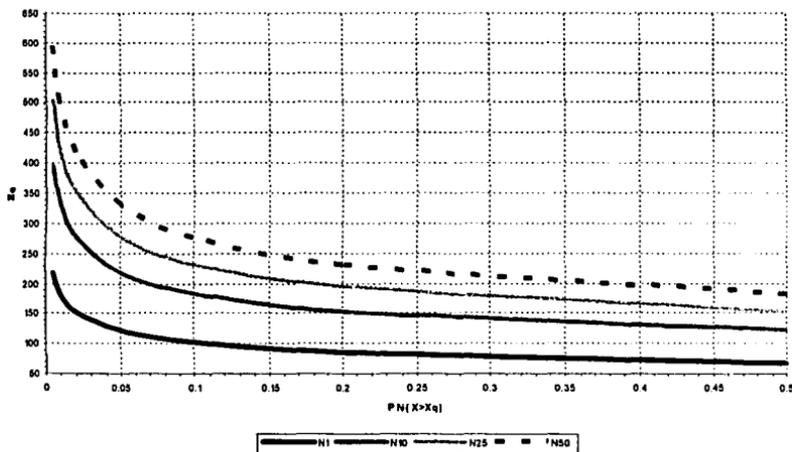


Figura VI-3 Probabilidad de excedencias, Estación Coatzacoalcos, Veracruz

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



VI.2 Aplicación de teorías de vibraciones aleatorias en el modelaje del viento y su interacción con las estructuras

VI.2. Aplicación de teorías de vibraciones aleatorias en el modelaje del viento y su interacción con las estructuras

El factor aleatorio más importante en el estudio del aire es la turbulencia, caracterizada por presentar cambios en la intensidad del flujo.

Se ha visto también que la turbulencia es mayor en el sentido longitudinal del flujo que en cualquier de los otros sentidos. Bajo esta base, se han elaborado estudios detallados con el fin de establecer las propiedades de las ráfagas que caracterizan la turbulencia.

Una herramienta eficaz de simulación es el método Monte Carlo, el cual consiste en obtener una serie de tiempo que establezca la posible variación de las ráfagas de viento a partir del empleo de los espectros de potencia característicos de cada una de las localidades estudiadas. Técnicamente dicho se le denomina a este como una suma de armónicos, con base a un espectro de potencia de interés, que simulan las velocidades de Reynolds.

La ecuación que define la serie de tiempo descrita esta dada por:

$$v(t) = \sqrt{2} \sum_{i=1}^N A_i \cos(2\pi f_i t + \phi_i)$$

Ecuación VI-2 Simulación de espectros

Donde ϕ_i se define por la ecuación VI-3.

$$\phi_i = 2\pi r$$

Ecuación VI-3 Variable aleatoria

r es una variable aleatoria independiente, uniformemente distribuida dentro del dominio $0 \leq r \leq 1$.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

VI. Procesos estocásticos aplicados a la ingeniería eólica



La amplitud A_i se determina mediante la siguiente ecuación.

$$A_i = \sqrt{2S_v(f_i)\Delta f}$$

Ecuación VI-4 Valor espectral

$S_v(f_i)$, es el valor en el espectro de potencia para la frecuencia dada y N , es el número de intervalos de la simulación.

Debido al gran trabajo numérico para obtener la simulación espectral, se tuvo que elaborar un programa para obtener las simulaciones correspondientes. El código del programa se describe a detalle en el capítulo VII.

Las figuras VI-4 a VI-13 muestran ejemplos de la simulación espectral para una estación específica, considerando los cambios de rugosidad propuestos Davenport. Las simulaciones restantes se ejemplifican en el anexo F²¹.

Comentarios a los resultados obtenidos

El primer punto más sobresaliente y quizás el más importante de estas simulaciones es el que establece que el RMS del espectro de potencia debe de ser prácticamente el mismo que el de la simulación espectral, por lo que se estableció como límite un error de 10 % entre el valor de un RMS y otro. Así mismo se comprueba que cada una de las simulaciones tienen un valor de media igual a cero, tal y como se obtendría si se obtuviera una serie de tiempo con mediciones de la velocidad del viento en una determinada localidad y se aislara las velocidades de Reynolds del resto de la componente. También podemos ver en las gráficas que a mayor rugosidad del terrenos mayores son las ráfagas que se presentan en el flujo.

Por último cabe mencionar que dado el carácter aleatorio del modelo bajo el cuál se simularan todas y cada una de las simulaciones, es poco probable que se obtengan dos simulaciones idénticas para una misma estación meteorológica.

²¹ CD-ROM *SYPRE* by Paris Reyes Aguilar.



VI.2 Aplicación de teorías de vibraciones aleatorias en el modelaje del viento y su interacción con las estructuras

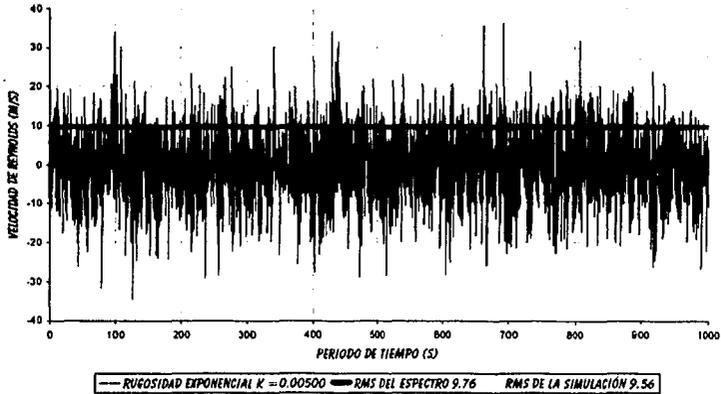


Figura VI-4 Simulación generada por el programa SYPRE estación Ensenada Baja California factor de rugosidad $k = 0.0050$

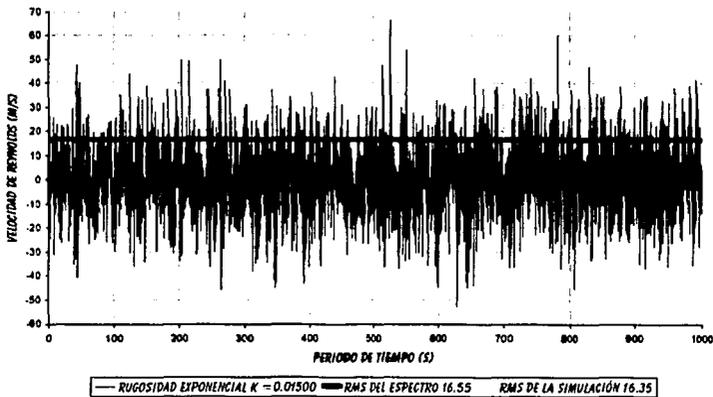


Figura VI-5 Simulación generada por el programa SYPRE estación Ensenada Baja California factor de rugosidad $k = 0.0150$

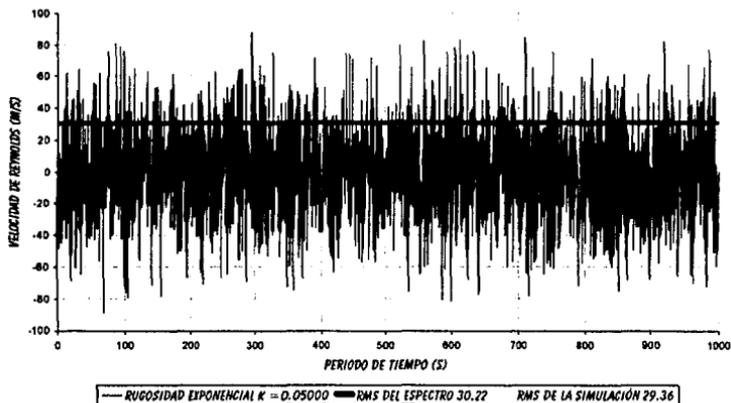


Figura VI-6 Simulación generada por el programa SYPRE estación Ensenada Baja California factor de rugosidad $k = 0.0500$

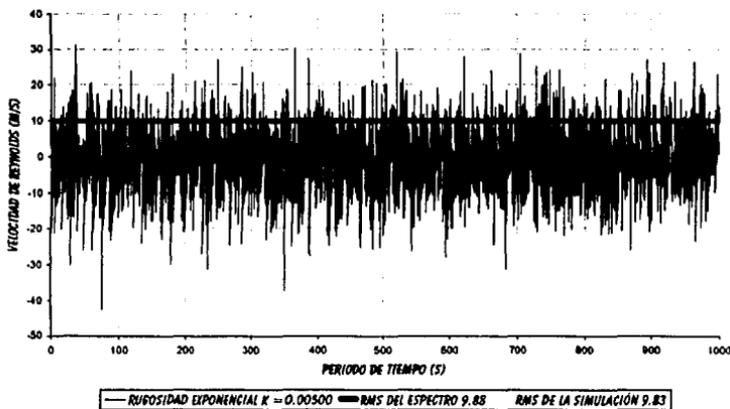


Figura VI-7 Simulación generada por el programa SYPRE estación Tapachula Chiapas factor de rugosidad $k = 0.0050$

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



VI.2 Aplicación de teorías de vibraciones aleatorias en el modelaje del viento y su interacción con las estructuras

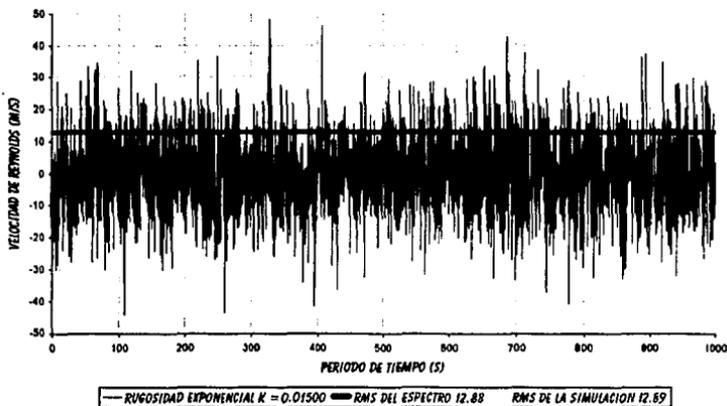


Figura VI-8 Simulación generada por el programa SYPRE estación Tapachula Chiapas factor de rugosidad $k = 0.0150$

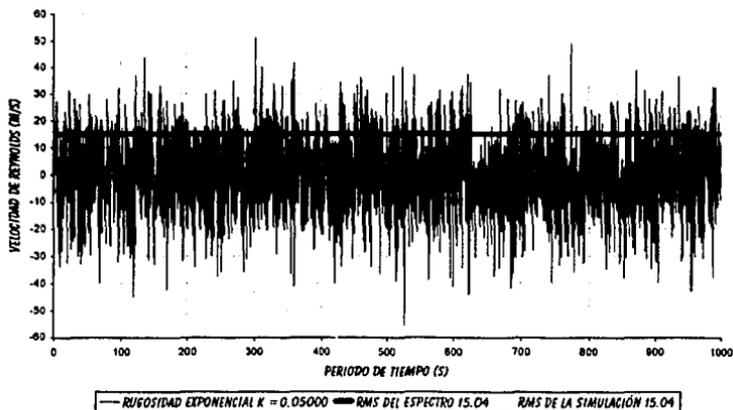


Figura VI-9 Simulación generada por el programa SYPRE estación Tapachula Chiapas factor de rugosidad $k = 0.0500$

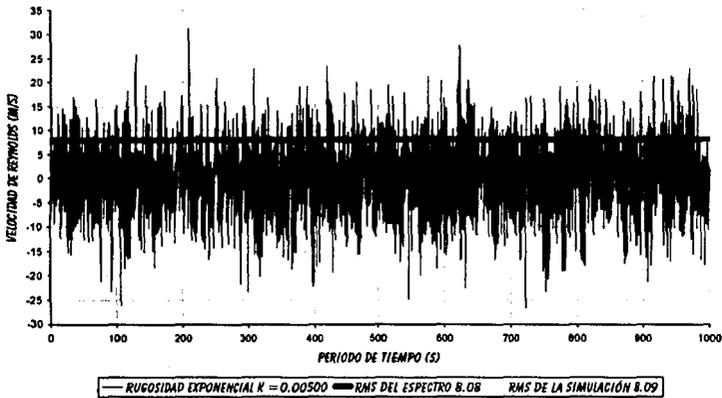


Figura VI-10 Simulación generada por el programa SYPRE estación Coatzacoalcos Veracruz factor de rugosidad $k = 0.0050$

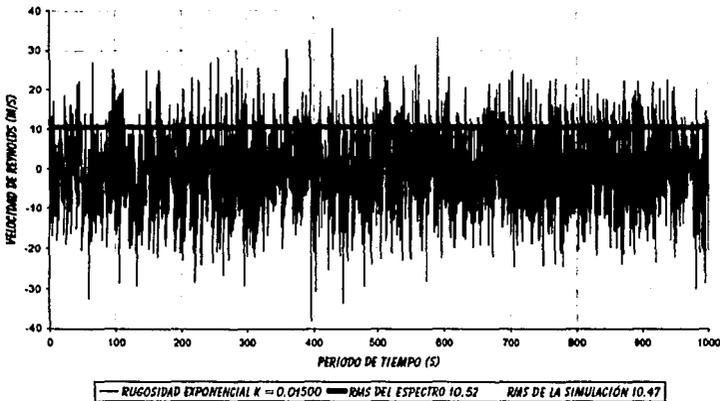


Figura VI-11 Simulación generada por el programa SYPRE estación Coatzacoalcos Veracruz factor de rugosidad $k = 0.0150$

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



VI.2 Aplicación de teorías de vibraciones aleatorias en el modelaje del viento y su interacción con las estructuras

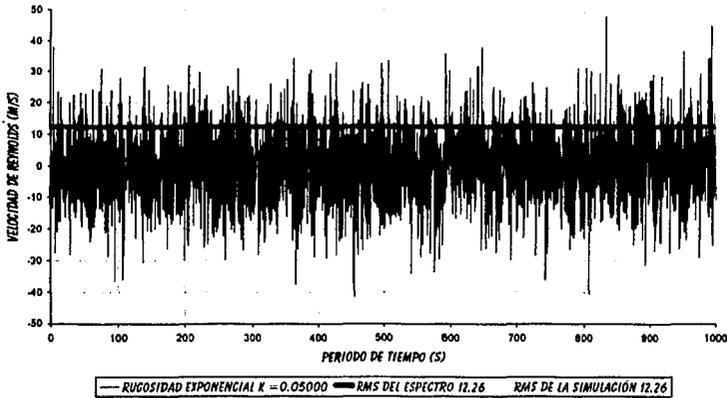


Figura VI-12 Simulación generada por el programa SYPRE estación Coatzacoalcos Veracruz factor de rugosidad $k = 0.0500$

Durante los procesos de simulación se verificó que el valor del RMS de la simulación, debe corresponder al RMS del espectro de potencia, que se calcula con la relación:

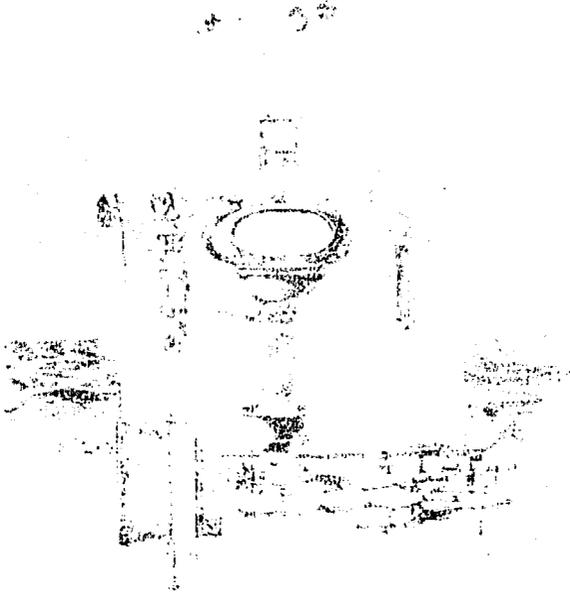
$$RMS = \sqrt{\int Sv(f)df}$$

Ecuación VI-5 RMS del espectro de potencia

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



CAPITULO VII: RUTINA PARA ESTABLECER EL RIESGO EÓLICO.



Todos somos aficionados la vida es tan corta que no da para mas.

Chaplin, Charles.



VII. Rutina para establecer el riesgo eólico



En este último capítulo se analiza una estructura en la que se establecen los procedimientos necesarios para el cálculo de las probabilidades de excedencias, producida por la acción turbulenta del viento. Además, se efectuará una descripción del programa de cómputo que se creó para su cálculo.

VII.1. Análisis de los parámetros estadísticos necesarios para establecer el riesgo eólico

El riesgo estructural que presenta una edificación, se define como la probabilidad que tiene una estructura, bajo la acción de una fuerza, de exceder un límite de utilidad estructural.

El tratamiento de este factor de riesgo tiene una importancia significativa cuando se elaboran estudios de confiabilidad estructural en edificaciones especialmente sensibles a los efectos turbulentos del viento.

Para una vida útil de N años, la probabilidad de excedencia $Pf_N(\delta)$ viene dada por:

$$Pf_N(\delta) = 1 - [1 - Pf^*(\delta)]^N$$

Ecuación VII-1 Probabilidad de falla de una estructura considerando la vida útil de la misma

En donde

$$Pf^*(\delta) = \int Pf_i(\bar{v}, \delta) P\bar{v}(\bar{v}) d\bar{v}$$

Ecuación VII-2 Probabilidad de falla de una estructura, después de que una estructura ha sido sometida a los efectos turbulentos del viento

Pf_i , es la probabilidad de exceder un determinado límite de utilidad estructural³² y se calcula a partir de la respuesta estructural de la edificación producida por los efectos dinámicos

³² Considérese esta como la máxima deformación, agrietamiento, vibración o daño permisible, que no afecte el correcto funcionamiento de los elementos que soportan las cargas.



VII.1 Análisis de los parámetros estadísticos necesarios para establecer el riesgo sísmico

del viento, es decir con la velocidad de diseño de la estación de análisis y su correspondiente simulación espectral, se obtiene una serie de desplazamientos correspondientes a cada uno de los puntos de la simulación espectral. Una vez que se tienen estos datos se genera un histograma de respuesta, en donde se acumula cada uno de los desplazamientos de acuerdo a la frecuencia que presenta cada uno de ellos durante el análisis. El gráfico de la figura VII-1, muestra un ejemplo uno de los histogramas característicos obtenidos con el programa *SYPRE*³³

Es importante notar que estos histogramas varían de uno a otro, incluso para una misma estación se pueden presentar cientos de casos diferentes, esto debido a que las ráfagas de viento generadas por el programa, emplea la teoría de vibraciones aleatorias, por que el corroborar los resultados aquí expuestos tendría que realizarse con simulaciones semejantes o abriendo los archivos que contiene la información pertinente.³⁴

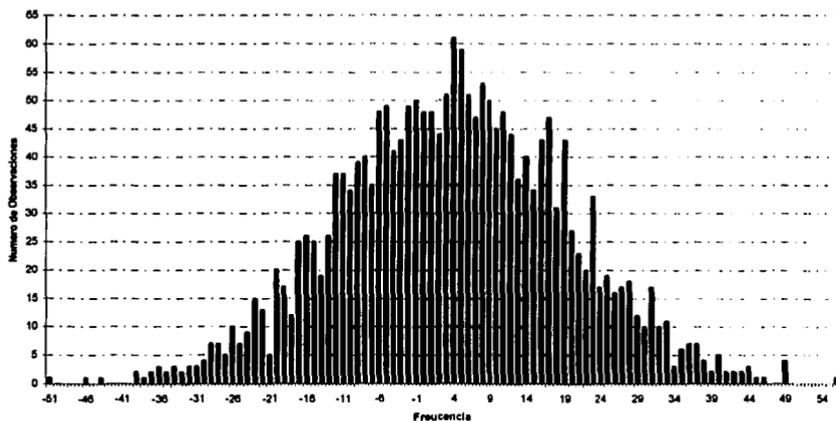


Figura VII-1 Histograma típico de desplazamientos obtenido con el programa Sypre.

³³ En el subcapítulo siguiente se describe a detalle las características del programa y su modo de empleo

³⁴ Ver CD-ROM *SYPRE* by Paris Reyes Aguilar



VII. Rutina para establecer el riesgo eólico

Una vez que se cuenta con el histograma, se procede a normalizar las graficas para obtener una curva de probabilidades como la que se muestra en la grafica de la figura VII-2.

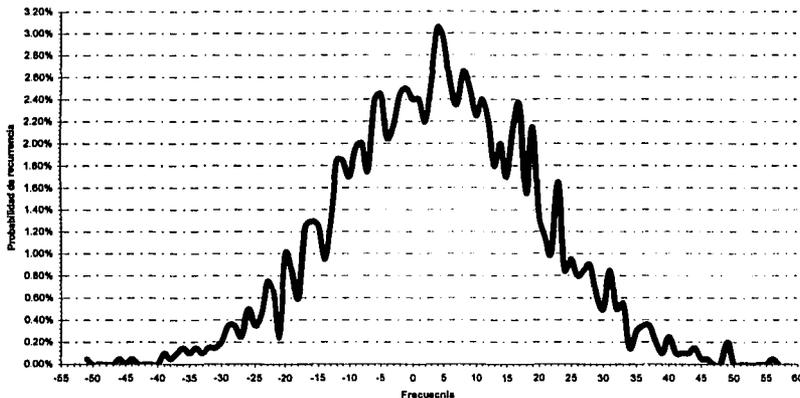


Figura VII-2 Distribución de Probabilidades obtenida con el programa SYPRE.

Con la curva resultante, se definen el valor de $Pf(\bar{v}, \delta)$, integrando el área bajo la curva de la distribución de probabilidad que se encuentra más allá del estado limite de referencia (ver capítulo VII-2), pero solo se considera la máxima probabilidad de excedencia ya sea positiva o negativa, pero nunca ambas simultáneamente.

El otro valor que define a la ecuación VII-II, es el coeficiente $Pv(\bar{v})$, el cual se define como la probabilidad de recurrencia de la velocidad media del viento v , y se obtiene utilizando las graficas del anexo D para distribuciones de probabilidad con ajuste Fisher-Tippett II.

Ya con este valor de $Pf_N(\delta)$, se procede a obtener la probabilidad de excedencia $Pf^*(\delta)$, para la velocidad media del viento, y aunque realmente tendríamos que elaborar este mismo procedimiento para cada una de las velocidades del viento que se pueden presentar durante la vida útil de la estructura, y así obtener la probabilidad de falla real de la misma, se



VII.1 Análisis de los parámetros estadísticos necesarios para establecer el riesgo sísmico

decidió reducir la muestra a esta única velocidad, pues el incluir todas y cada una de las velocidades factibles de presentarse habría aumentado el tiempo de cálculo, aun con el uso de los sistemas computacionales más actuales de una manera muy significativa.

VII.2. Ejemplo de aplicación.

La estructura que se analizará comprende un anuncio espectacular tipo unipolar en forma de T. Este anuncio esta constituido por un gabinete de forma rectangular soportado por armaduras metálicas de 40 cm de ancho. La longitud y la altura de las armaduras es de 12.00 y 4.50 m respectivamente. La altura total del anuncio a partir del nivel de banqueteta es de 20.50 m tal y como lo muestra la figura VII-3.

En la tabla VII-1 se establecen los pesos para cada uno de los elementos que conforman la estructura. Los pesos correspondientes a la carga viva e instalaciones se fijaron de acuerdo a la [Ref. 20].

CONCEPTO	W (KG)
CARTELERA	1620
INSTALACIONES	1080
ARMADURAS Y LARGUEROS	1572
COLUMNA DE SOPORTE	2655
CARGA VIVA POR REGLAMENTO	140
PESO TOTAL DE LA ESTRUCTURA	7067.

Tabla VII-1 Peso por elemento de acuerdo a lo estipulado en el RCDF-1993.

Una vez obtenidos los pesos correspondientes a cada uno de los elementos estructurales de la edificación, se decidió concentrar la masa total de la estructura en el centro de gravedad de la cartelera. Con esto, se hizo que el modelo matemático del anuncio, se ajustará a la respuesta de un sistema dinámico de un solo grado de libertad (Ec. IV-14). Para definir de una manera adecuada el factor de fuerza $F(t)$ prescrito en dicha ecuación, es necesario el empleo un variable más denominada coeficiente de fuerza C_D , cuyo valor se calcula de acuerdo al reglamento de diseño u análisis. Para efectos del presente se optó por obtener este a partir de las

VII. Rutina para establecer el riesgo edífico

recomendaciones señaladas por la [Ref. 5]. La ecuación VII-4 define cada uno de los parámetros que considera dicha referencia para el cálculo del coeficiente.

$$C_D = C_{pm} k_p F_t^2 F_c^2 F_{rp}^2$$

Ecuación VII-3 Coeficiente de fuerzas de acuerdo a los parámetros establecidos por la CFE

K_p es el factor de reducción de presión por porosidad y su valor esta relacionado con la solidez del muro, para fines de este trabajo se despreciaron los efectos por porosidad en el anuncio y se establece un factor de reducción de presión por porosidad igual a uno, equivalente a la porosidad presente sobre una superficie sólida.

C_{pm} es un coeficiente que determina la presión neta sobre el anuncio y se calcula de acuerdo a la establecido por la tabla VII-2.

F_t es un factor que considera el tiempo que actúa la ráfaga de viento sobre la edificación

F_p es el factor que toma en cuenta los efectos topográficos de la zona y

F_{rp} es el factor que establece la variación de la velocidad del viento de acuerdo a la rugosidad del terreno y a la altura de la construcción.

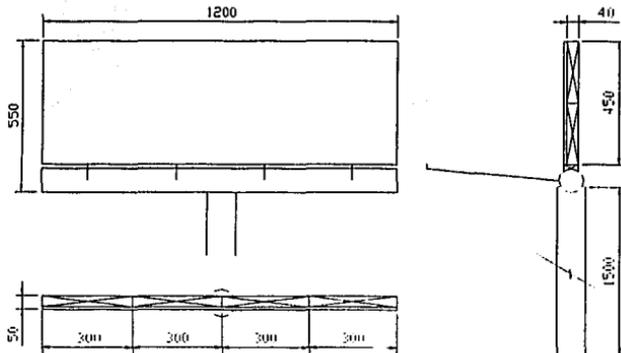


Figura VII-3 Ejemplo de aplicación. Anuncio espectacular tipo unipolar



Las especificaciones correspondientes a cada uno de los factores anteriores se establecieron a partir de los siguientes criterios:

Dado que la estructura en análisis se trata de una edificación especialmente sensible a los efectos de las ráfagas esta se considera como una construcción tipo dos (tabla IV-3)³⁵.

La categoría del terreno y la clase de la estructura tipo uno y clase A, respectivamente²⁵.

$$C_D = 1.50(1.0)(1.0)^2(1.0)^2(1.206)^2 = 2.1828$$

Ecuación VII-4 Valor característico del coeficiente de fuerzas.

$0 < H_d/H < 0.2$	$0.2 \leq H_d/H \leq 0.7$
$1.2 + 0.02 \left[\frac{b}{h_e} - 5 \right]$	1.5

Tabla VII-2 Coeficiente de presión neta de acuerdo a los dispuesto por la CFE

Establecido el correspondiente coeficiente de fuerza C_D , se procede a fijar los estados límite de la estructura, según las recomendaciones establecidas en la [Ref. 20], donde se establece que para un comportamiento lineal los desplazamientos máximos permisibles no deben sobrepasar de 0.012 veces la altura de la edificación.

Una vez que se cuenta con cada uno de los parámetros que intervienen en el cálculo de la probabilidad de excedencia se procede a elaborar el estudio de riesgo. Para lo cual es necesario el empleo del programa *SYPRE* (*Simulación y Probabilidad de Riesgo Eólico*). Cuyo modo de empleo, criterios de programación y condiciones de análisis se elaboraron de acuerdo a lo dispuesto en cada uno de los capítulos precedentes, por lo que el lector tendrá que referirse al capítulo correspondiente para conocer los criterios bajo los cuales se obtuvo cada uno de los resultados.

³⁵ La descripción específica para cada una de estas clasificaciones así como sus correspondientes ecuaciones se describen a detalle en los capítulos II y IV.



Esto a pesar de tratarse de una estructura de un solo grado de libertad donde el número de procedimientos matemáticos necesarios para obtener la probabilidad de excedencias de cada estación analizada es muy extenso, por lo que no se incluye en el capítulo presente ningún resultado previo y solo se optó por presentar algunas de las curvas de probabilidad de excedencias (gráficas de las figuras VII-4 a VII-12) para distintas condiciones de amortiguamiento, frecuencia, rugosidad y vida útil de la estructura, ya que estas además de condensar todos los resultados para una misma estación, ejemplifican de una mejor forma la tendencia de cada una de las probabilidades. El total de las curvas de probabilidad se ejemplifican en el Anexo G³⁶.

Comentarios a los resultados obtenidos

Definitivamente el comportamiento de cada una de las curvas de probabilidad de excedencia presentan características particulares; por ejemplo se puede apreciar que a velocidades del viento mayores a 50 m/s la pendiente que se presenta en estas curvas tiene un valor pequeño y casi constante; sin embargo para velocidades del viento menores a los 50 m/s la probabilidad de excedencia presenta un rápido decrecimiento a medida que se hace más rígida la estructura.

Algo muy parecido sucede con los factores de rugosidad del terreno a mayor rugosidad la pendiente de la curva de probabilidad de excedencia se vuelve más pronunciada en cambio con factores de rugosidades menores dicha pendiente se va haciendo más pequeña. Esto conlleva a un fenómeno poco predecible en el cual se crean puntos de inflexión para casi todas las curvas. Las figuras VII-13 a VII-16 ejemplifican a mayor detalle esto, pues en ellas se observa que las curvas de probabilidad presentan un comportamiento normal hasta determinado valor de frecuencia, a partir del cual las curvas se entre cruzan y aquella que tenía un valor de excedencia mayor, cambia a tener una probabilidad de excedencia menor y viceversa.³⁷

³⁶ CD-ROM SYPRE by Paris Reyes Aguilar

³⁷ Cabe mencionar que el punto de inflexión es característico de cada velocidad y en ninguno de los casos este se presenta sobre la misma frecuencia.

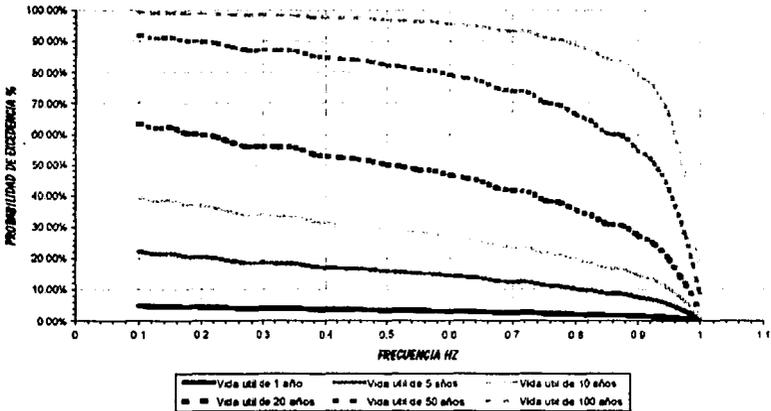


Figura VII-4 Curvas de riesgo eólico con un 5% de amortiguamiento Estación Ensenada Baja California Factor de rugosidad $k = 0.0500$

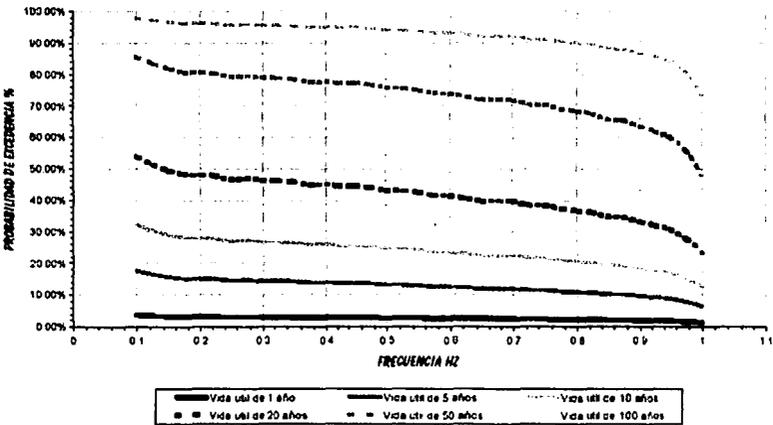


Figura VII-5 Curvas de riesgo eólico con un 5% de amortiguamiento Estación Ensenada Baja California Factor de rugosidad $k = 0.0150$

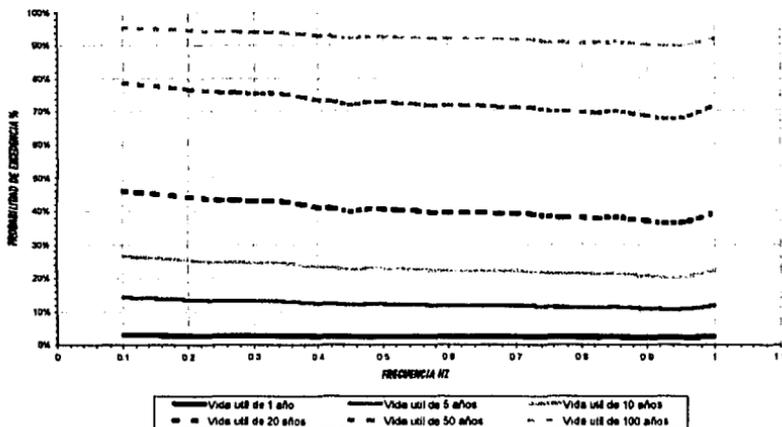


Figura VII-6 Curvas de riesgo eólico con un 5% de amortiguamiento Estación Ensenada Baja California Factor de rugosidad $k = 0.0050$

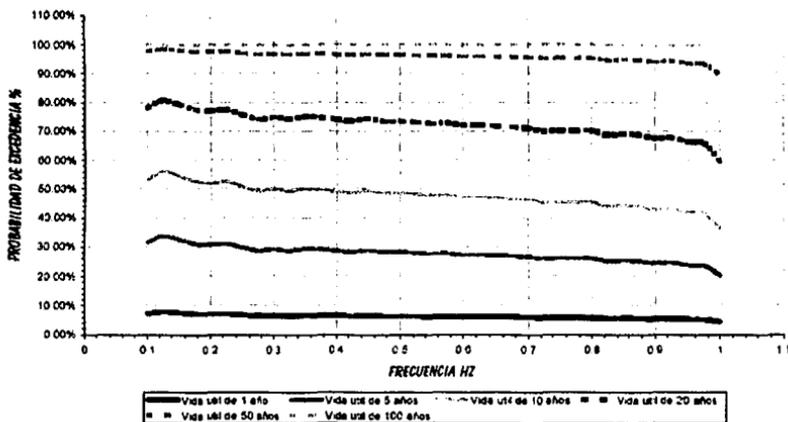


Figura VII-7 Curvas de riesgo eólico con un 5% de amortiguamiento estación Tapachula Chiapas factor de rugosidad $k = 0.0500$

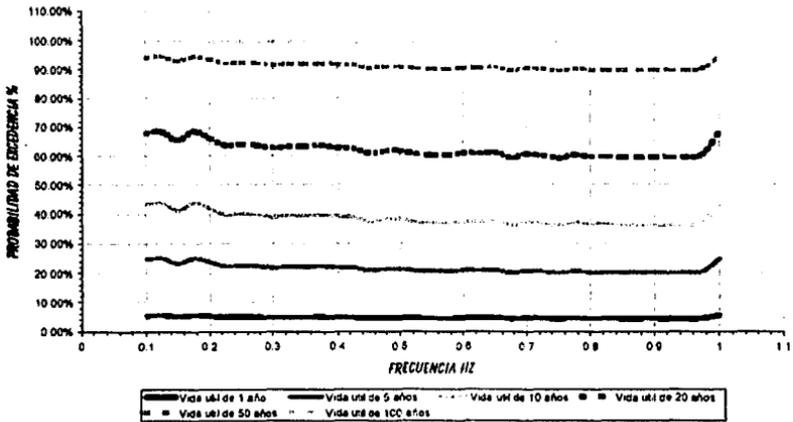


Figura VII-8 Curvas de riesgo eólico con un 5% de amortiguamiento estación Tapachula Chiapas factor de rugosidad $k = 0.0150$

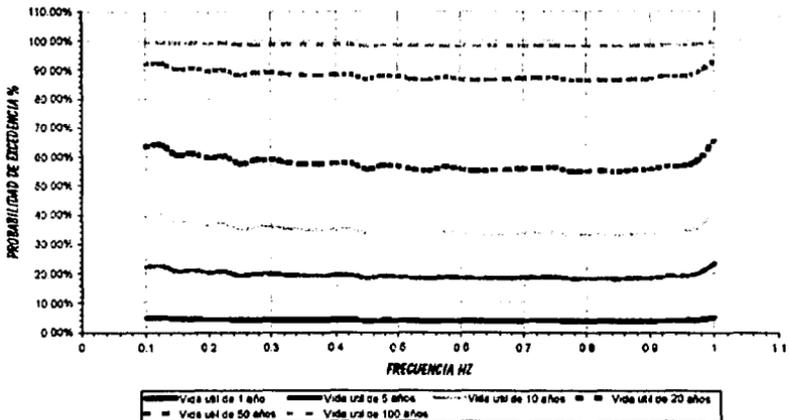


Figura VII-9 Curvas de riesgo eólico con un 5% de amortiguamiento estación Tapachula Chiapas factor de rugosidad $k = 0.0050$



VII. Rutina para establecer el riesgo edóico

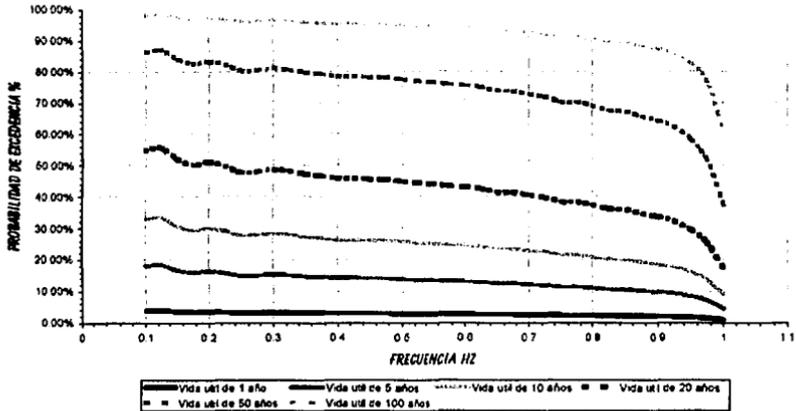


Figura VII-10 Curvas de riesgo edóico con un 5% de amortiguamiento estación Coatzacoalcos Veracruz factor de rugosidad $k = 0.0500$

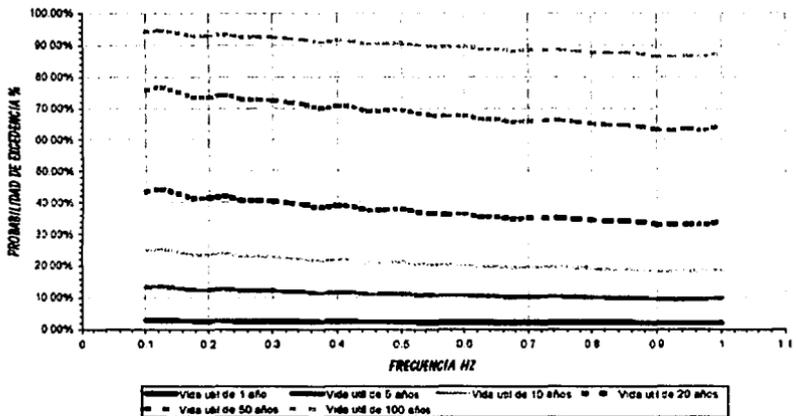


Figura VII-11 Curvas de riesgo edóico con un 5% de amortiguamiento estación Coatzacoalcos Veracruz factor de rugosidad $k = 0.0150$

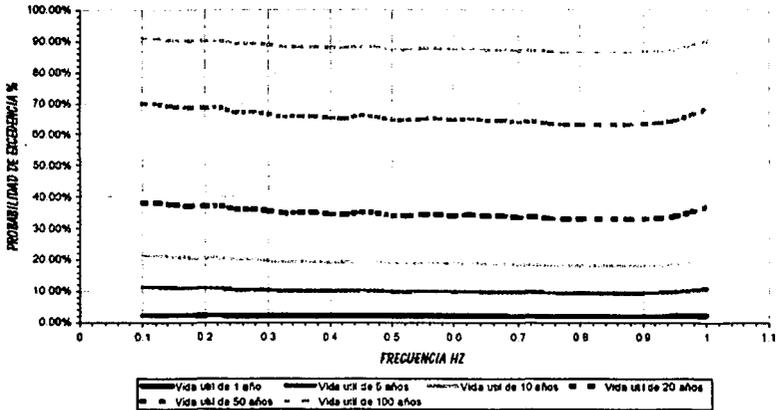


Figura VII-12 Curvas de riesgo eólico con un 5% de amortiguamiento estación Coatzacoalcos Veracruz factor de rugosidad $k = 0.0050$

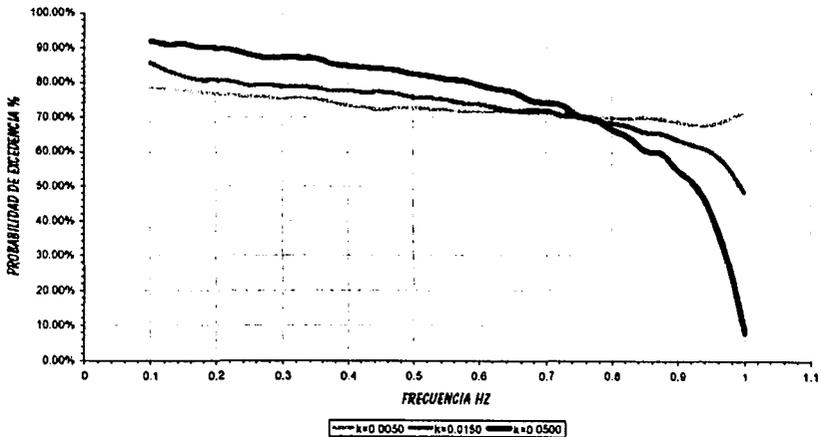


Figura VII-13 Curvas de riesgo eólico para una vida útil de 100 años estación Ensenada Baja California Norte

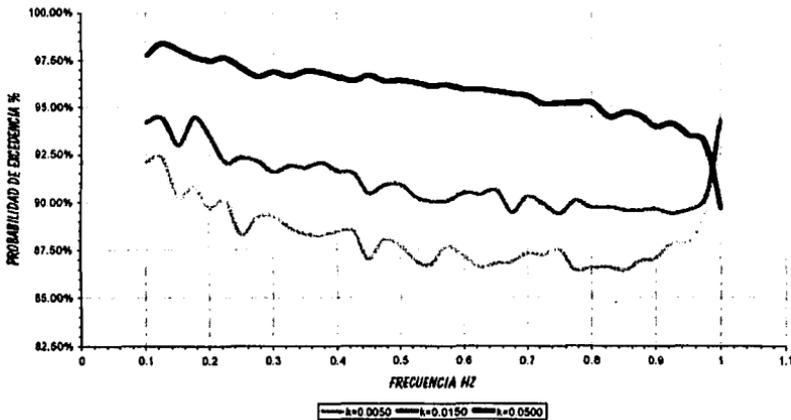


Figura VII-14 Curvas de riesgo eólico para una vida útil de 100 años estación Tapachula Chiapas

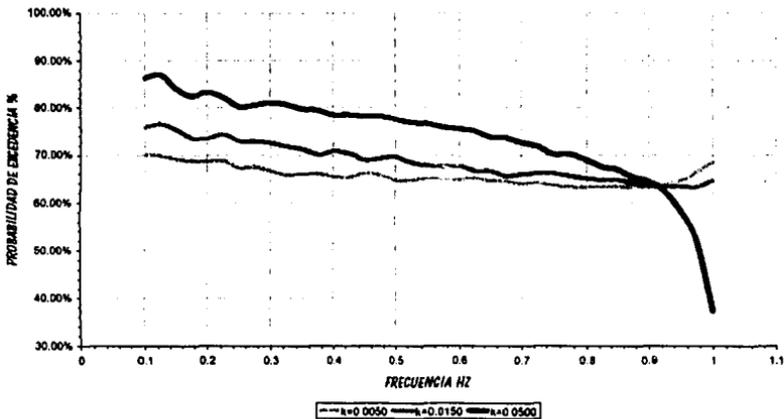


Figura VII-15 Curvas de riesgo eólico para una vida útil de 100 años estación Coatzacoalcos Veracruz



A continuación, se presentan graficas del cálculo de las probabilidades de excedencia para las 25 ciudades analizadas. Las curvas son para 5 % de amortiguamiento estructural y vida útil de 20 años.

Comentarios a los resultados obtenidos

Un fenómeno que sobresale del estudio de las curvas de riesgo eólico, es que en ellas se aprecia que no necesariamente a mayor velocidad del viento mayor será la probabilidad de excedencia presente en la estructura, pues los resultados indican figuras VII-16 a VII-18 que para velocidades del viento inferiores a los 50 m/s, la probabilidad de excedencia presente en estructuras con frecuencias bajas, es en la mayoría de los casos mucho mayor que la que se obtiene con una velocidad de viento superior a los 50 m/s. Sin lugar a dudas este es un fenómeno particularmente extraño y dado que no existen antecedentes de este tipo de curvas de probabilidad de riesgo eólico, no podemos establecer la confiabilidad de estas ni tampoco las podemos descartar en un posible estudio.

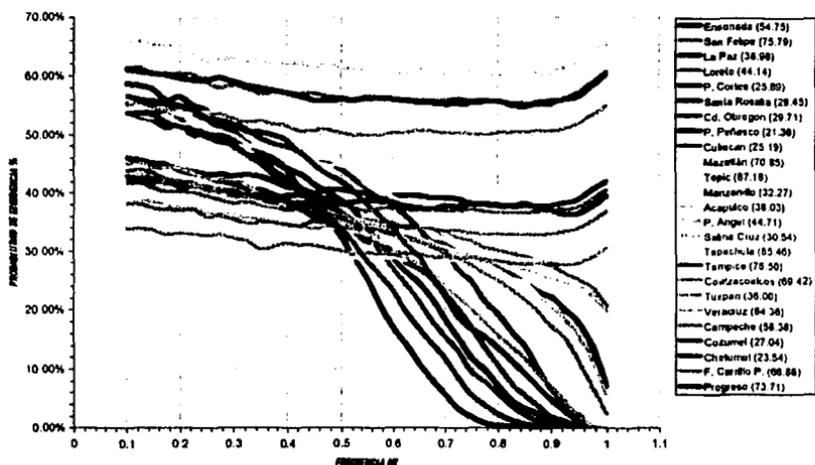


Figura VII-16 Curvas de riesgo eólico con un 5% de amortiguamiento $k = 0.0050$ y una vida útil de 20 años

VII. Rutina para establecer el riesgo eólico

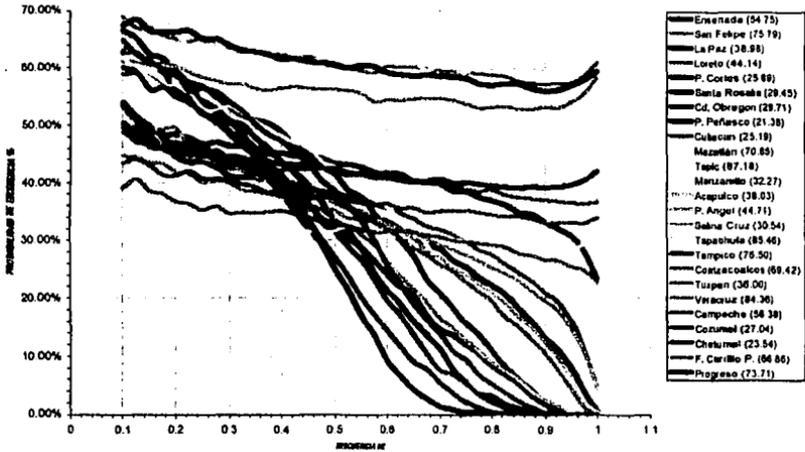


Figura VII-17 Curvas de riesgo eólico con un 5% de amortiguamiento $k = 0.0150$ y una vida útil de 20 años

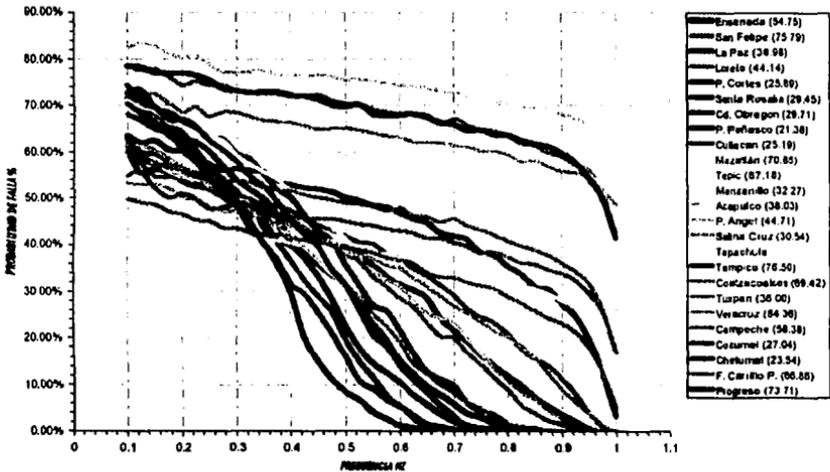


Figura VII-18 Curvas de riesgo eólico con un 5% de amortiguamiento $k = 0.0500$ y una vida útil de 20 años



VII.3 Guía de manejo del programa SYPRE y rutinas de programación

VII.3. Guía de manejo del programa SYPRE y rutinas de programación.

El programa SYPRE (*Simulación y Probabilidad de Riesgo sísmico*) esta codificado, bajo un código visual llamado Visual Basic 6 y su finalidad es el establecer la probabilidad de excedencia de una estructura de un grado de libertad a partir de la aplicación de las cargas laterales correspondientes al viento medio (carga estática) más la correspondiente respuesta de la estructura a los efectos turbulentos de las ráfagas de viento (carga dinámica) y encontrar la respuesta total de cada estructura.

Los requerimientos mínimos y óptimos del sistema para un adecuado funcionamiento del código fuente de SYPRE se muestran en la tabla VII-13. Los tiempos necesarios para la elaboración de cada uno de los análisis se promedio a partir de diversas muestras las cuales arrojaron los siguientes resultados de la tabla VII-14.

	MÍNIMOS	ÓPTIMOS
SISTEMA OPERATIVO	Windows 95	Windows Xp
PROCESADOR	Pentium a 75 MHz	Pentium IV a 1.7 GHz
ESPACIO EN DISCO DURO	32 MB	32 MB
MEMORIA RAM	4 MB	32 MB
UNIDAD DE CD	4 x	52 x
TARJETA GRAFICA	VGA	SVGA
RESOLUCIÓN	800x600	800x600

Tabla VII-3 Requisitos para la instalación y operación de SYPRE

PROCESO	TIEMPOS NECESARIOS POR EQUIPO (S)	
	MÍNIMOS (MIN.)	ÓPTIMOS (MIN)
INSTALACIÓN	8.00	1.10
CURVAS DE PROBABILIDAD	1:00 a 16:00 hrs.	10.00 a 40.00
ÍNDICES DE TURBULENCIA	1:40	0.04
ESPECTROS DE POTENCIA	1:50	0.02
ESCALAS DE TURBULENCIA	2:10	0.04
SIMULACIÓN ESPECTRAL	2:30 a 17:00	0.10 a 5.50
ANÁLISIS DINÁMICO	3:00	0.55
CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL	1.20	0.15

Tabla VII-4 Tiempos de operación necesarios para efectuar los diversos procesos dispuestos en el programa SYPRE



Proceso de Instalación.

1. Inicie Microsoft Windows en modo estándar o mejorado.
2. Verifique que todas las aplicaciones que se encuentren en su sistema estén debidamente cerradas.
3. Si su PC cuenta con un programa de protección contra virus, deberá invalidarlo o desactivarlo momentáneamente antes de ejecutar el programa de instalación de *SYPRE*. Una vez que termine de instalar el programa *SYPRE*, podrá activar nuevamente su programa antivirus
4. Introduzca el CD-ROM *SYPRE by Paris Reyes Aguilar*, en la unidad de CD de su computadora.
5. Espere a que finalice la presentación que se ejecutara automáticamente (sino se inicia ninguna presentación al insertar el CD-ROM *SYPRE by Paris Reyes Aguilar* abra el explorador de Windows y en su unidad de Disco extraíble abra el CD-ROM *SYPRE by Paris Reyes Aguilar* haga clic en la carpeta Paquete y después en la aplicación Setup).
6. Haga clic con el botón derecho del Mouse sobre el icono de instalación de *SYPRE by Paris Reyes Aguilar*. Aparezca una pantalla azul con la leyenda Instalación de *SYPRE*, en el cuadro de dialogo que se muestra sobre dicha pantalla aparecerá una leyenda que le indicara que cierre todos sus programas antes de instalar *SYPRE*; si usted ya verifico que todos los programas estén correctamente cerrados haga clic en el botón aceptar de dicho cuadro de dialogo, si por el contrario alguno de sus programas se están ejecutando, cierre estos, o suspenda la instalación hasta que todos los programas estén cerrados.
7. Una vez verificado el paso anterior seleccione la ubicación y asigne un nombre a la carpeta donde se almacenara el código del programa.
8. Sobre la misma pantalla haga "clic" sobre el botón de instalación tal como lo muestra la figura VII-19.
9. Elija un nombre para la carpeta del acceso directo que se mostrara en el menú archivos de programa y haga "clic" en el botón continuar.

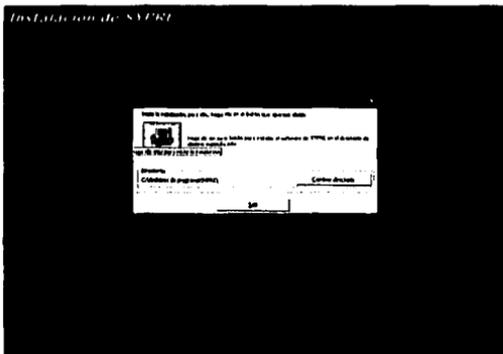


Figura VII-19 Pantalla de instalación de SYPRE

- Una vez que aparezca la pantalla de la figura VII-20 solo le restará esperar unos segundos para que su sistema se actualice y usted estar listo para ejecutar el programa SYPRE.

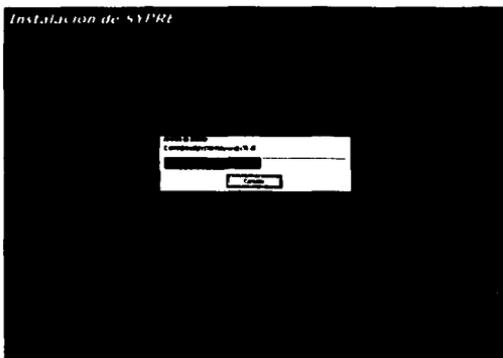


Figura VII-20 Pantalla de proceso de instalación de SYPRE

Nota: En ocasiones los controladores que vienen incluidos con el código del programa, necesitan actualizar su sistema antes de finalizar la instalación de SYPRE, por lo que si le aparece

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



VII. Rutina para establecer el riesgo edífico

un cuadro de dialogo informándole que deberá de reiniciar el sistema, haga clic en aceptar y vuelva a iniciar la instalación de *SYPRE*.

Iniciar y salir de *SYPRE*.

1. En la barra de herramientas de Windows, haga clic en el botón de inicio
2. Posicione el Mouse sobre el vinculo Archivos de Programa, hasta localizar la carpeta de *SYPRE* o del nombre que le allá asignado y haga clic en *SYPRE* tal y como o muestra la figura VII-21.
3. Una vez que aparezca la ventana de *SYPRE*, en la barra de menú haga "clic" en el menú archivo y selecciona la función que desees.

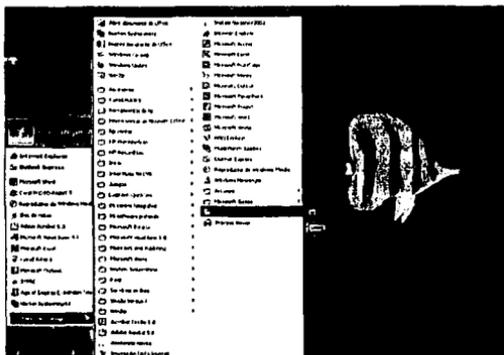


Figura VII-21 Como ejecutar *SYPRE* desde el menú Archivos de Programa.

4. Si seleccionaste la opción Generar nuevo proyecto seleccioné la carpeta y el nombre del archivo en donde se guardarán los datos de la simulación generada por el programa *SYPRE* y haga "clic" en el botón Guardar.
5. En la ventana que se despliega (figura VII-22) escoja el estado de la República para el cual se desea generar el análisis.
6. Una vez seleccionado algún estado, aparecerá una nueva ventana (figura VII-23) en la cual se podrá introducir los datos de Velocidad media, Latitud, Longitud y



VII.3 Guía de manejo del programa SYPRE y rutinas de programación

desviación estándar de una forma manual o bien desde el CD-ROM SYPRE by Paris Reyes Aguilar al seleccionar alguna de las estaciones predeterminadas. Una vez completados los datos anteriores, haga "clic" en aceptar. Esto hará regresar a la pantalla de la figura VII-22.

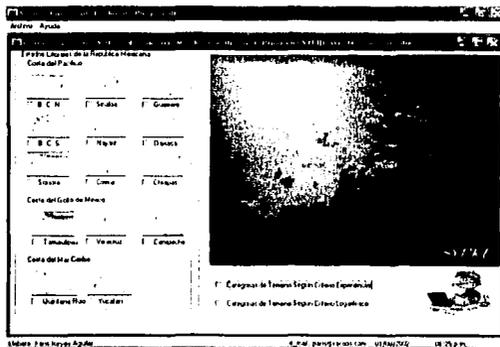


Figura VII-22 Ventana inicial de SYPRE (Lectura de Datos)

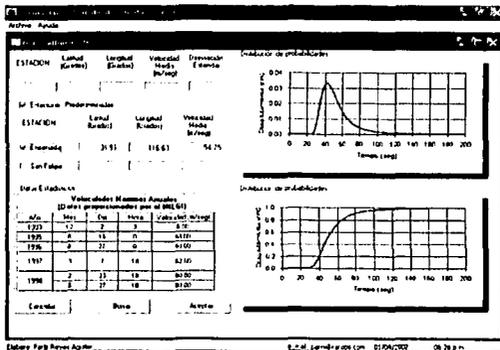


Figura VII-23 Ventana secundaria de SYPRE (Distribuciones de Probabilidad)

7. Se puede repetir los pasos 5 a 6 todas las veces que se desee, procurando no acceder dos veces al mismo estado ya que puede no cargarse las modificaciones realizadas.



8. Seleccione el criterio mediante el cual desea generar el análisis. Para ello haga "clic" sobre la casilla de verificación Categorías de terreno según criterio exponencial o Categorías de terreno según criterio logarítmico de la figura VII-22.
9. Al seleccionar alguna de las casillas de verificación anteriores, aparecerá un cuadro con las rugosidades correspondientes a cada criterio; se seleccionan todas aquellas para las cuales se quiere elaborar el diagnóstico (tomar en cuenta que por cada rugosidad, el tiempo de cálculo aumentará en proporción a la velocidad del procesador).
10. Una vez escogidas las estaciones y el criterio de análisis haga "clic" sobre el icono "continuar análisis".
11. En la nueva ventana, cargar la estación con la cual se desea iniciar el estudio. Esto se hace desplegando la pestaña con la leyenda "Estación". (Ver figura VII-24)
12. Seleccionar la tarea que se desea que *SYPRE* calcule (El código calcula una a una cada una de las tareas de tal forma que se puede omitir el calculo de una o varias de estas). Esto lo haces desplegando la pestaña con la leyenda Generar (Ver figura VII-25).

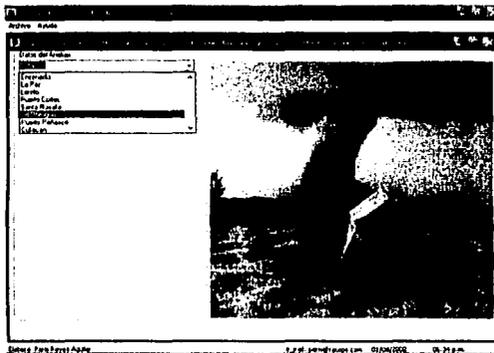


Figura VII-24 Ventana de cálculos preliminares de *SYPRE* (Elección de Estación)

13. Para proceder a realizar el análisis dinámico, es necesario que se genere una simulación de la velocidad de Reynolds de la estación, y se proceda a almacenarla



VII.3 Guía de manejo del programa *SYPRE* y rutinas de programación

en el archivo predeterminado. Esto se hace seleccionando "Simulación Espectral" del menú desplegable "Generar", tal y como lo muestra la figura VII-25.

14. Una vez completado el paso anterior, se procede a seleccionar el tipo de rugosidad para la cual se desea que *SYPRE* realice la simulación. Para ello se despliega el menú "Simular con", y se selecciona alguno de los parámetros de rugosidad que se cargaron previamente (Ver figura VII-26).
15. Se escoge un factor de ajuste β entre 1 y 2 y se hace "clic" en la gráfica de barra para generar la simulación
16. En este momento el programa *SYPRE*. inicia un ciclo el cual solo se detiene hasta que los RMS tanto del espectro como de la simulación tengan una aproximación de ± 4 centésimas.



Figura VII-25 Ventana de cálculos preliminares de *SYPRE* (Elección del análisis)

17. Una vez que se logra la precisión adecuada de los RMS, se procede a guardar la simulación en el archivo que se definió al principio; para esto solo basta con hacer "clic" en el icono de fichero que apatece arriba del botón "Análisis Dinámico", y aparecerá un cuadro de diálogo confirmando que la simulación se guardó satisfactoriamente tal y como lo muestra la figura VII-27.



VII. Rutina para establecer el riesgo sísmico

18. Una vez almacenadas todas las simulaciones que *SYPRE* empleará para efectuar el análisis dinámico, se hace "clic" en el botón "Análisis Dinámico"
19. En la ventana que aparece figura VII-28 se elige nuevamente la estación para la cual se desea realizar el análisis dinámico para que se cargue la simulación que se guardó con anterioridad.

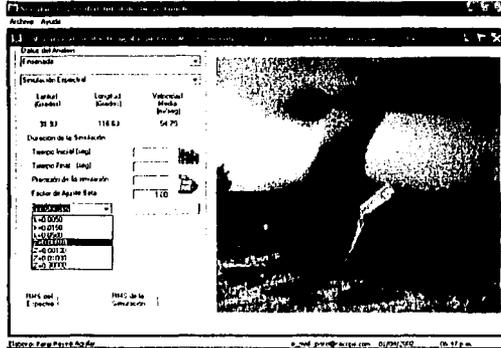


Figura VII-26 Ventana de cálculos preliminares de *SYPRE* (Simulación espectral).

20. Se ingresa cada una de las propiedades de la estructura y se establece las condiciones de desplante de la misma.

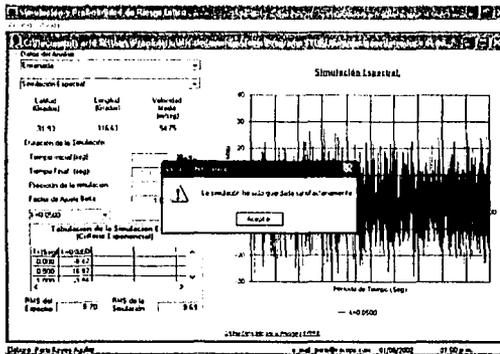


Figura VII-27 Ventana de cálculos preliminares de *SYPRE* (Mensaje de Aviso)



21. Presiona el botón “Analizar” y se espera unos minutos hasta que la tabla de la derecha se llene en su totalidad tal y como lo muestra la figura VII-28

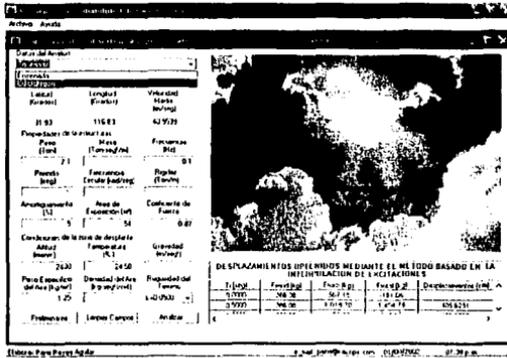


Figura VII-28 Ventana de análisis dinámico de SYPRE (Introducción de Datos).

22. Una vez que se ha efectuado el análisis dinámico, se pueden ver las distintas curvas de distribución que se generaron a partir de las series de tiempo de desplazamientos que SYPRE generó. Para ello, se despliega el menú “Visualizar grafica de:”; tal y como lo muestra la figura VII-29

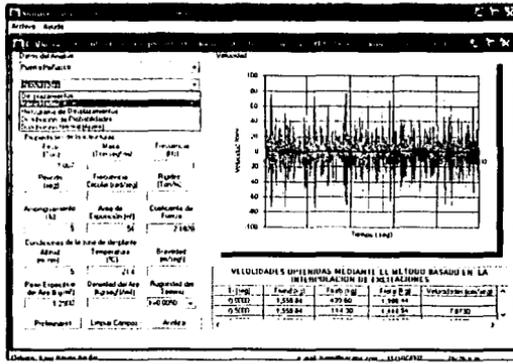


Figura VII-29 Ventana de análisis dinámico de SYPRE (Grafico de desplazamientos)

VII. Rutina para establecer el riesgo sísmico

23. Para obtener el valor de la confiabilidad estructural se selecciona en el menú "Visualizar grafica de:" la opción "Distribución de probabilidades", y esta aparecerá a la derecha en una grafica semejante a la de la figura VII-12

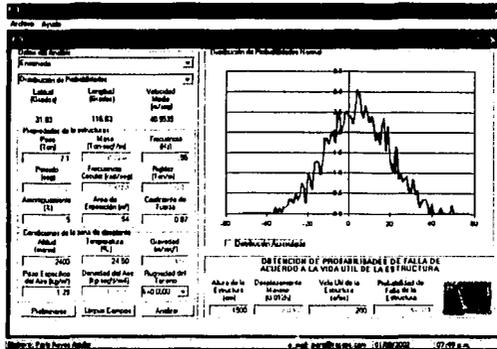


Figura VII-30 Ventana de análisis dinámico de SYPRE (Confiabilidad estructural)

24. En el recuadro inferior se llenan los datos faltantes correspondientes a la altura de la edificación y a la vida útil de la misma y se presiona el icono que se sitúa a la derecha para obtener la probabilidad de excedencia de la estructura.
25. Se pueden cambiar tanto los datos de las propiedades de la estructura como los de las condiciones de desplante o incluso solo se puede alterar la altura de la estructura y su vida útil para obtener un nuevo análisis.

El diagrama de flujo que se muestra en la figura VII-31 muestra los pasos más importantes del programa SYPRE pues el incluir todo el diagrama haría un tanto tedioso el leerlo y la comprensión de este. Asimismo en el anexo H se muestra el código fuente necesario para el buen funcionamiento del programa SYPRE. Debido a que este consta de aproximadamente 16,707 líneas de instrucción, se optó por no imprimirlo y solo se incluye el código en el archivo electrónico³⁸.

³⁸ CD-ROM SYPRE by Paris Reyes Aguilar



VII.3 Guía de manejo del programa SYPRE y rutinas de programación

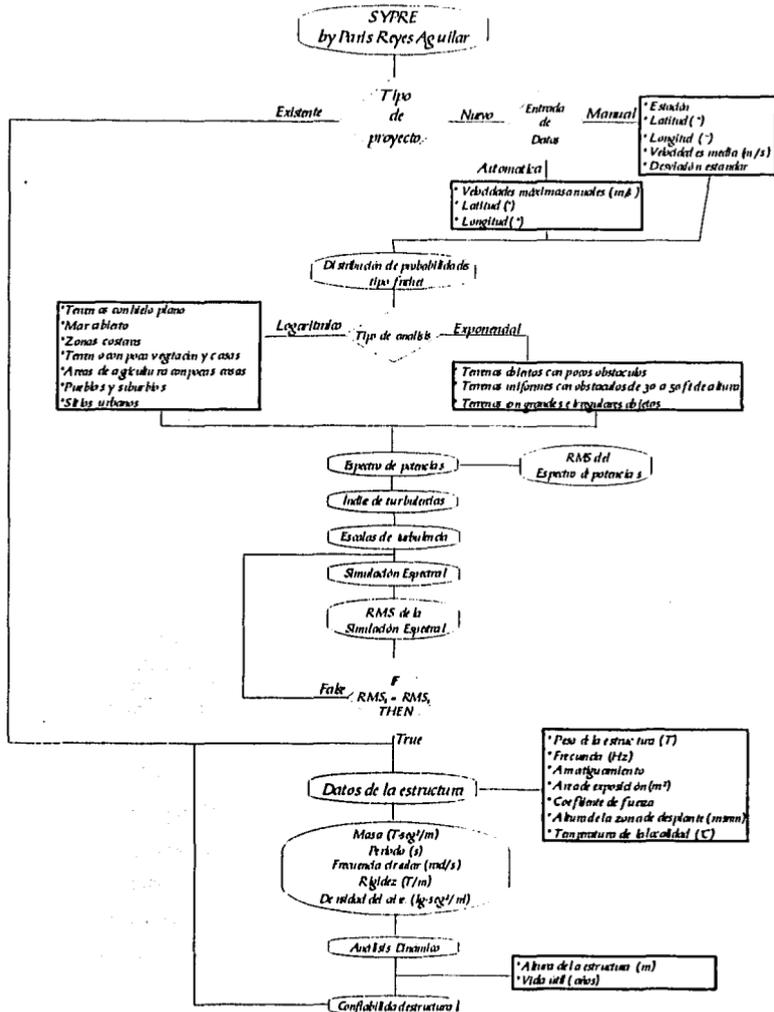


Figura VII-31 Diagrama de flujo del programa SYPRE.

CONCLUSIONES

La imposibilidad de vivir en un mundo absolutamente seguro, en donde tanto los individuos como las sociedades están expuestos a un gran número de riesgos, ha llevado al ser humano a concebir instrumentos que minimizan los riesgos a los que estamos expuestos en nuestra vida cotidiana. Tales son los casos de algunos de ellos que el factor de riesgo al que se esta expuesto llega ha ser tan mínimo que incluso no se percata uno de su existencia. No obstante, cuando, en los factores de riesgo se involucra a un gran número de pérdidas humanas y materiales, lejos de olvidarse de su existencia, se crean medias para prevenir en lo posible tales riesgos.

Así pues el tratamiento de los factores de riesgo tiene una importancia significativa cuando se elaboran estudios de confiabilidad estructural, especialmente en aquellas edificaciones sensibles a los efectos turbulentos del viento. Pues el riesgo estructural que presenta una edificación desplantada en zonas susceptibles a vientos intensos, muchas de las veces repercute, para propósitos de la ingeniería civil, ya sea en altos costos de construcción o en la pérdida tanto material como de vidas humanas.

Es por ello que en este trabajo se propone una metodología aunque sea básica para establecer probabilidades de excedencia en estructuras de un solo grado de libertad desplantadas en costas de la Republica Mexicana y sujetas a huracanes de gran escala. Y si bien todos y cada uno de los resultados finales son altamente discutibles y cuestionables; y muchos de los lectores no estén totalmente de acuerdo con los criterios de análisis ni mucho menos con los valores obtenidos, no podemos afirmar de manera alguna, que una o todas las curvas de probabilidades de excedencias que se desarrollaron son erróneas, ya que no existe antecedente alguno ni en México ni en otras partes del mundo, que invaliden lo dispuesto por esta investigación, y hasta que se realice un estudio semejante o se corrobore el presente mediante el empleo de algún modelo físico expuesto en algún túnel de viento, el presente trabajo pone sobre la mesa los criterios de análisis actuales, bajo los cuales se vienen diseñando los elementos estructurales de las edificaciones civiles. Ya que en ninguno de ellos

se hace mención alguna a factores de probabilidad de excedencia, riego eólico, o cualquier otro nombre que se le pueda dar a la probabilidad de recurrencia de un desplazamiento máximo permitido, independientemente del tipo de reglamento que se este empleando para el diseño de los elementos estructurales.

Con esto se espera que algún día se logre lo mismo con los lineamientos de riesgo estructural ante otras solicitaciones dinámicas. Pero primero debemos eliminar la tendencia que se tiene de no revisar dinámicamente cada una de las estructuras sujetas a los efectos del viento, particularmente cuando se trata de estructuras extremadamente sensibles, donde la carga dominante se genera a partir de una o varias corrientes de viento.

Si bien como se vio a lo largo de este trabajo, existen gran cantidad de variables involucradas en los estudios del efecto del viento en estructuras, y aunque, las propiedades del viento varían para cada zona de desplante y los efectos de tipo estático así como los fenómenos dinámicos de interacción dependen de características geométricas y algunas propiedades dinámicas, asociadas a distintos tipos de estructuras, los distintos reglamentos en el mundo han buscado, basados en estudios estadísticos del viento y en pruebas experimentales, generalizar lineamientos para permitir a los calculistas determinar en forma rápida los coeficientes de presión en cada zona expuesta de una estructura en particular. Sin embargo, dinámicamente, los procesos de interacción flujo-estructura se complican, y todavía en el presente, los reglamentos a escala mundial ofrecen procedimientos de fácil aplicación.

Además en nuestro país se ha hecho poco por establecer características de riesgo eólico ni tampoco se ha incursionado en técnicas más avanzadas que minimicen estos factores, es importante hacer notar que la seguridad que aporta este tipo de estudios a la elección de una adecuada velocidad de diseño, puede en muchos de los casos, proporcionar al estructurista las herramientas necesarias para concebir factores de carga mas adecuados, ya que el aplicar técnicas cada vez más precisas para describir el comportamiento de una estructura a lo largo de su vida útil con lleva a maximizar cada una de las respuestas estructurales de la edificación y ha minimizar los posibles daños producidos en la misma.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Es por eso que se creó una serie de curvas que establecen la probabilidad de excedencias de una estructura ante una sollicitación de tipo dinámico, cuya función principal es minimizar la incertidumbre que comúnmente se tiene al analizar una estructura. Es decir cuando la curva de probabilidad de excedencia arroja un valor de recurrencia baja para la velocidad de diseño bien podemos disminuir el coeficiente del factor de carga por viento, disminuyendo a su vez las dimensiones de los elementos estructurales de la edificación, y llevando a un ahorro significativo en el costo de la estructura. Por el contrario si se cuenta con un alto valor de probabilidad de recurrencia para la velocidad de diseño, el calculista tendrá que considerar un valor para el coeficiente de carga, lo suficientemente alto para que se garantice la seguridad de la estructura durante la vida útil de la misma.

No hay que olvidar que el aumento en el valor del coeficiente de carga, variara también de acuerdo al periodo de retorno para el cual se este diseñando la estructura, pues a periodos mas altos mayores serán las probabilidades de recurrencia de la velocidad de diseño.

Otra más de las ventajas que se puede obtener con este tipo de estudios es que con estos no son tan limitativo, pues si bien se puede llegar a realizar espectro de diseño que envuelvan las componentes más desfavorables de los vientos intensos en determinadas localidades respetando siempre algunas consideraciones específicas,

Ya por ultimo este trabajo, no solo es importante por insta a la comunidad estructural a incursionar en el estudio de un nuevo criterio de análisis el cual consiste en establecer o diseñar elementos estructurales acordes al desempeño que estos pueden tener en una construcción. Sino por que este, crea un sistema básico interactivo como base para estudios más avanzados de confiabilidad estructural en los siguientes posibles campos de investigación:

- a. Utilización de técnicas para procesos no-Gaussianos y no-estacionarios, para simular, por ejemplo, los campos de ráfagas que se presentan en huracanes y otros fenómenos meteorológicos intensos.
- b. Incursionar en la respuesta no-lineal de estructuras, y estudiar la aleatoriedad de otros parámetros tales como propiedades de rugosidad, parámetros estructurales, etc.

-
- c. Estudiar a detalle la presencia histórica de huracanes en México, y ajustar funciones de probabilidad especiales a la ocurrencia de estos fenómenos.
 - d. Realizar sistemas complementarios para determinar parámetros estadísticos necesarios y estimar pérdidas económicas probables de estructuras y comunidades sujetas a vientos extremos.

TESIS CON

FALLA DE ORIGEN

BIBLIOGRAFIA

- ✦ Albert Miller, **Meteorology**. Columbus, Ohio: Charles E. Merrill Books, Inc. 1972
- ✦ Amavizca Rascon, Francisco Oswaldo. **Respuesta dinámica de estructuras bajo la acción turbulenta del viento**. Tesis de Maestría en Ingeniería (Estructuras) UNAM, Asesor, Rodríguez Cuevas Neftali, 1984
- ✦ Arce León Carlos, **Fuerza del viento en estructuras**, Tesis licenciatura, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Campus Acatlán, 1985.
- ✦ Claës Dyrbye and Svend O. Hasen, **Wind Loads on Structures**, John Wiley & Son New York 1997.
- ✦ Comisión Federal de Electricidad, **Manual de diseño por viento**. México DF, 1993
- ✦ Emil Simiu and Robert H Scanlan, **Wind effects on structures**, John Wiley & Son New 3er edition USA 1996
- ✦ Engineering Sciences Data Unit, **Characteristics of Atmospheric Turbulence Near the Ground**, ESDU 85020, London, U.K 1986
- ✦ Ferdinand P. Beer and E. Russell Jonhston, Jr. **Mecánica vectorial para ingenieros (Dinámica)**. Mc Graw Hill 5a edición México 1997
- ✦ Ghiocel, D., Lungu, D., **Wind, snow and temperature effects on structures based on probability**, Abacus Press, Kent, England 1972
- ✦ J. D. Holmes **Mode Shape corrections for dynamic response to wind** CSIRO Division of building research, highest, Victoria, Australia, November 1986
- ✦ Juventino Carlos Reyes Salinas. **Revisión de criterios para estimar la acción turbulenta del viento en estructuras**. Tesis de Maestría en Ingeniería (Estructuras) UNAM, Asesor, Rodríguez Cuevas Neftali, 1992
- ✦ Kareem, A., **Modeling and Simulation of Wind Effects**, International Symposium on Wind and Structures for the 21st Century, Cheju, Korea 2000
- ✦ M. Ashraf Ali and P.L. Gould. **On the resonant component of the response of single degree of freedom systems under random loading**. Department of civil engineering, Washington University, St. Louis, MO, USA. February 1984
- ✦ María Coronado, **Extreme value theory (evt) for risk managers: pitfalls and opportunities in the use of evt in measuring var**. phd october 2000 Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. Department of Finance.
- ✦ Naya, Antonio. **Iniciación a la meteorología aplicada**. Madrid: Ediciones Penthalon, 1987. Obra de divulgación; incluye mapas y gráficos.

-
- ✦ Neftali Rodríguez Cuevas, Aplicación de la estadística de extremos a la determinación de velocidades del viento para diseños estructurales, Octubre 1964 Núm. 105, Series del Instituto de Ingeniería, UNAM.
 - ✦ Normas Técnicas Complementarias Diseño por viento. R.C.D.F.
 - ✦ Phillip L. Gould and Salman H Abu-Sitta, Dynamic Response of structures to wind and earthquake loading, Pentech Press. Great Britain 1980
 - ✦ Octavio A. Rascon y Rafael Brito, Determinación estadística de las velocidades para diseño eólico de estructuras en la ciudad de México, Septiembre 1984 Núm. 481, Series del Instituto de Ingeniería, UNAM.
 - ✦ Ramírez Sabag Said, Acción del viento en las estructuras, Tesis Licenciatura Facultad de Ingeniería UNAM. Asesor Colinas Villoslada Felix, 1983
 - ✦ Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, México, D.F. 1995
 - ✦ Roberto Meli, Diseño estructural, Limusa, México, DF. 2001
 - ✦ Roger G. Barry Y Richard J. Chorley, Atmosphere, weather and climate, Editorial Routledge, 7ª edición. Londres, 1998
 - ✦ Roldán Casas, J.A., Dios Palomares, R., Series temporales no estacionarias. Error en la especificación de la tendencia, Departamento de Estadística ETSIAM-Córdoba Documento de Trabajo del Dpto. de Estadística. DT 99.03-M
 - ✦ R.V. Milford Gust loading factors for lighting masts, Division of building technology. South Africa January 1988
 - ✦ Schueller, G.I., Bucher, C.G., Prenninger, P.H.W. Influence of mean wind speed, surface roughness and structural damping on the reliability of wind loaded buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Amsterdam. 1988.
 - ✦ Sverre Pettersen, Ph D, Introducción a la meteorología, Madrid: Ediciones Espasa-Calpe, S.A. 5ª edición, 1976.
 - ✦ V. Koloušek, M. Pirner, O. Fischer, J. Náprstek, Wind effects on civil engineering structures Elsevier, Czechoslovakia 1984.
 - ✦ W. E. Knowles Middleto Y Athelstan F. Spilhaus, Meteorological instruments

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

OTRAS FUENTES CONSULTADAS

- ✦ Meteorología, Enciclopedia Microsoft® Encarta® 2000 © 1993-1999 Microsoft Corporation.
- ✦ <http://www.windpower.org>
- ✦ <http://www.smn.cna.gob.mx/smn-info/hm-smn1.html>
- ✦ <http://www.smn.cna.gob.mx/smn-info/hm-smn2.html>
- ✦ http://www208.55.53.229/esdv/CONTENIDO_4_LA_ENERGIA_DEL_VIENTO.htm
- ✦ <http://www.coimmsa.com.mx/welcome.htm>
- ✦ <http://www.coimmsa.com.mx/welcome.htm>
- ✦ <http://www.itlp.edu.mx/publica/tutoriales/investoper2/tema45.htm>

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla II-1 Coeficiente α, según RCDF-1993</i>	29
<i>Tabla II-2 Clasificación de la superficie terrestre de acuerdo a la rugosidad que se presenta en ella, propuesta elaborada por [REF. 5]</i>	30
<i>Tabla II-3 Clasificación de las edificaciones de acuerdo a las dimensiones que se presentan en ella, propuesta elaborada por [REF. 5]</i>	30
<i>Tabla II-4 Coeficiente α, según [REF. 5]</i>	31
<i>Tabla II-5 Coeficiente Z_0 según la Engineering Science Data Units (ESDU)</i>	32
<i>Tabla II-6 Coeficiente $Z_0 k_i$ y Z_{min} según el Eurocódigo 1</i>	33
<i>Tabla II-7 Coeficiente δ según [REF. 5]</i>	36
<i>Tabla II-8 Factores de topografía según CFE 1993</i>	36
<i>Tabla II-9 Coeficiente F_c según [REF. 5]</i>	36
<i>Tabla II-10 Relación entre la altitud y la presión barométrica, propuesta realizada por la [REF. 5]</i>	37
<i>Tabla II-11 Índice de turbulencia para una altura de 10 metros sobre el nivel del terreno propuesto por Davenport.</i>	40
<i>Tabla II-12 Coeficientes α y k propuestos por Harris para calcular el índice de turbulencia</i>	41
<i>Tabla III-1 Tipos de procesos estocásticos que existen dentro de la naturaleza.</i>	57
<i>Tabla IV-1 Factores de corrección de la presión de viento por condiciones de exposición.</i>	66
<i>Tabla IV-2 Clasificación de los factores de presión según el RCDF-1993</i>	66
<i>Tabla IV-3 Clasificación de las estructuras según su respuesta ante la acción del viento, (criterio establecido por la CFE y el RCDF).</i>	68
<i>Tabla IV-4 Coeficientes A, B, C, D, A', B', C' y D'</i>	71
<i>Tabla V-1 Velocidades regionales para las ciudades costeras más importantes de la republica Mexicana, propuestas por la CFE.</i>	75
<i>Tabla V-2 Velocidades regionales para las ciudades costeras más importantes de la republica Mexicana, obtenidas a partir de velocidades medias anuales registradas por el SMN.</i>	79
<i>Tabla VII-1 Periodos de retorno y probabilidades de excedencia.</i>	87
<i>Tabla VII-1 Peso por elemento de acuerdo a lo estipulado en el RCDF-1993.</i>	102
<i>Tabla VII-2 Coeficiente de presión neta de acuerdo a los dispuesto por la CFE</i>	104
<i>Tabla VII-3 Requisitos para la instalación y operación de SYPRE</i>	114
<i>Tabla VII-4 Tiempos de operación necesarios para efectuar las diversas tareas dispuestas en el programa SYPRE.</i>	114

Ecuación II-1 Ecuación que describe el perfil exponencial propuesto por Davenport	28
Ecuación II-2 Modificación propuesta por el RCDF-1993 al perfil propuesto por Davenport.	29
Ecuación II-3 Perfil propuesto por G.I. Taylor y O.A Sutton	29
Ecuación II-4 Modelo matemático que describe el comportamiento de la variación de la velocidad del viento de acuerdo a un perfil logarítmico.	31
Ecuación II-5 Fricción que ejerce la velocidad del viento con la superficie del terreno.	31
Ecuación II-6 Modificación propuesta por el Eurocódigo 1 al Perfil propuesto por el ESDU.	32
Ecuación II-7 Expresión propuesta por CFE, para estimar la variación de la velocidad del viento con la altura.	35
Ecuación II-8 Ecuación que establece el cambio de la densidad del aire para una altura de referencia, propuesta establecida por la [REF. 5].	37
Ecuación II-9 Magnitud vectorial de la velocidad el viento	38
Ecuación II-10 Componentes vectoriales de un vector de la velocidad del viento	38
Ecuación II-11 Descomposición de la velocidad del flujo de viento.	39
Ecuación II-12 Relación para definir el índice de turbulencia a una altura z	40
Ecuación II-13 Relación propuesta por Harris que describe la variación del índice de turbulencia con la altura Z sobre el nivel del terreno	41
Ecuación II-14 Relación propuesta por el ESDU que describe la variación del índice de turbulencia con la altura z sobre el nivel del terreno.	42
Ecuación II-15 Espectro normalizado de potencia.	46
Ecuación II-16 Espectro de potencia propuesto por A. G. Davenport.	46
Ecuación II-17 Espectro de potencia propuesto por Harris.	46
Ecuación II-18 Espectro de potencia propuesto por Simiu para altas frecuencias.	47
Ecuación II-19 Espectro de potencia propuesto por Simiu para bajas frecuencias.	47
Ecuación II-20 Espectro de potencia propuesto por el Engineering Science Data Unit.	47
Ecuación II-21 Parámetros propuestos por el ESDU para calcular la variación del espectro de potencia (Las expresiones faltantes se definen unos párrafos atrás).	48
Ecuación III-1 Función de probabilidad que representa un conjunto finito de valores	56
Ecuación III-2 Función de probabilidad que representa un proceso estocástico	57
Ecuación III-3 Ecuación de movimiento para un edificio con N grados de libertad	58
Ecuación III-4 Deducción del valor de la carga del viento sobre una superficie.	59
Ecuación III-5 Simplificación que solo considera los efectos de la velocidad mediatle viento.	59
Ecuación III-6 Componentes de la carga producida por la acción del viento sobre una estructura.	59
Ecuación IV-1 Presión directa de un fluido en una superficie a partir de la ecuación de Bernoulli.	63
Ecuación IV-2 Presión estática producida por la velocidad media del viento de acuerdo al RCDF-1993	64
Ecuación IV-3 Factor correctivo según la altura sobre la cual se encuentra la zona expuesta. Los valores de a se muestran en la tabla IV-1.	64
Ecuación IV-4 Presión estática producida por la velocidad media del viento de acuerdo a la [REF. 5]	64
Ecuación IV-5 Presión de diseño según el tipo de superficie. La ecuación a corresponde a estructuras cerradas, mientras que la b se emplea en general para elementos aislados.	65
Ecuación IV-6 (a) y (b) representan las presiones estática exterior e interior producida por la velocidad media del viento de acuerdo a la [REF. 5] respectivamente.	65
Ecuación IV-7 Presión estática producida por la velocidad media del viento de acuerdo a la [REF. 5].	65
Ecuación IV-8 Velocidad de diseño del viento de acuerdo a la [REF. 5].	66
Ecuación IV-9 Función de excitaciones	69
Ecuación IV-10 Incremento de fuerza	69
Ecuación IV-11 Ecuación de movimiento para sistemas expuestos a excitaciones aleatorias.	69
Ecuación IV-12	70
Ecuación IV-13	70
Ecuación IV-14	70
Ecuación V-1 Media o esperanza matemática	76
Ecuación V-2 Desviación estándar	76
Ecuación V-3 Coeficiente de variación	77

<i>Ecuación V-5</i> Desviación estándar	2
<i>Ecuación V-6</i> Coeficiente de variación	2
<i>Ecuación V-7</i> Distribución de probabilidad Fisher-Tippett tipo II.	2
<i>Ecuación V-8</i> Distribución de probabilidad acumulada Fisher-Tippett tipo II.	2
<i>Ecuación VI-1</i> Probabilidad de excedencias	2
<i>Ecuación VI-2</i> Simulación de espectros	2
<i>Ecuación VI-3</i> Variable aleatoria	2
<i>Ecuación VI-4</i> Valor espectral	2
<i>Ecuación VI-5</i> RMS del espectro de potencia.	2
<i>Ecuación VII-1</i> Probabilidad de falla de una estructura considerando la vida útil de la misma.	2
<i>Ecuación VII-2</i> Probabilidad de falla de una estructura, después de que una estructura ha sido sometida a los efectos turbulentos del viento.	2
<i>Ecuación VII-3</i> Coeficiente de fuerzas de acuerdo a los parámetros establecidos por la CFE	2
<i>Ecuación VII-4</i> Valor característico del coeficiente de fuerzas.	2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1-1 Representación esquemática del movimiento atmosférico que se presenta en la troposfera.</i>	4
<i>Figura 1-2 Representación esquemática del movimiento atmosférico que se presenta en la troposfera sin movimiento de rotación figura A y con movimiento de rotación figura B.</i>	7
<i>Figura 1-3 Representación esquemática de las masas de aire que se presentan en el mar de China (monzones).</i>	9
<i>Figura 1-4 Ejemplo de circulación atmosférica a pequeña escala, en la que se presentan cambios estacionales de acuerdo a la época del año.</i>	10
<i>Figura 1-5 Circulación general de la atmósfera en la que se ve con detalle las células septentrionales y meridionales de Hadley y Ferrel, los cinturones polares, los vientos alisios y contra alisios, todos ello separado en lo alto por cuatro corrientes en chorro provenientes del oeste y una del este.</i>	11
<i>Figura 1-6 Diseños de veletas de viento comúnmente usadas, (A) veleta clásica, (B) veleta extendida, (C) veleta aerodinámica.</i>	12
<i>Figura 1-7 Esquema representativo de un anemómetro de rotación con cazoletas.</i>	14
<i>Figura 1-8 Anemómetros de rotación por aletas, la figura A muestra un anemómetro de piso que incluye manómetro en tanto la figura B muestra en anemómetro con aleta integrada.</i>	16
<i>Figura 1-9 (A) Anemómetro en péndulo desarrollado por Hooke en 1667, (B) anemómetro de esfera desarrollado por la asociación Británica de Investigación Eléctrica (BERA).</i>	17
<i>Figura 1-10 Anemómetro tipo Osler</i>	18
<i>Figura 1-11 Anemómetro Dines, La sección A representa la parte sensible del aparato mientras que la sección B muestra la parte registradora</i>	19
<i>Figura 1-12 Esquema ilustrativo del anemómetro Dines.</i>	20
<i>Figura 1-13 Radar de comunicaciones empleado para la transmisión de datos de una estación meteorológica a otra</i>	21
<i>Figura 11-1 Simulación de la velocidad del viento a diferentes alturas; la línea más gruesa del perfil representa la componente de la velocidad media, en tanto la línea más delgada simboliza la turbulencia presente en la zona.</i>	27
<i>Figura 11-2 Registro de velocidades de viento a distintas alturas sobre el nivel del terreno.</i>	28
<i>Figura 11-3 Variación de la velocidad del viento de acuerdo a rugosidades propuestas por el ESDU y Davenport.</i>	33
<i>Figura 11-4 Variación de la velocidad del viento durante un periodo de tiempo, la figura (a) muestra variaciones del registro de velocidades en amplitudes pequeñas, mientras que en el segundo caso, figura (b) la amplitud de las variación es mayor; estas diferencias se atribuyen a la rugosidad que presenta cada tipo de terreno</i>	34
<i>Figura 11-5 Componentes de la velocidad del viento en un tiempo t</i>	38
<i>Figura 11-6 Componentes de un vector de velocidad del viento.</i>	39
<i>Figura 11-7 Variación del índices de turbulencia para cada tipo de terreno de acuerdo al Criterio Exponencial propuesto por Harris</i>	43
<i>Figura 11-8 Variación del índices de turbulencia de acuerdo al Criterio Logarítmico propuesto por el ESDU (Estación Ensenada, Baja California Norte).</i>	44
<i>Figura 11-9 Variación de los índices de turbulencia de acuerdo a las rugosidades propuestas por el ESDU (Estación Tapachula, Chiapas).</i>	44
<i>Figura 11-10 Variación de los índices de turbulencia de acuerdo a las rugosidades propuestas por el ESDU (Estación Coatzacoalcos, Veracruz).</i>	45
<i>Figura 11-11 Ubicación de estaciones meteorológicas analizadas en este trabajo.</i>	45
<i>Figura 11-12 Espectro de potencia de acuerdo al criterio propuesto por R.I. Harris (Estación Ensenada, Baja California Norte).</i>	49
<i>Figura 11-13 Espectro de potencia de acuerdo al criterio propuesto por el ESDU (Estación Ensenada, Baja California Norte).</i>	50
<i>Figura 11-14 Espectro de potencia de acuerdo al criterio propuesto por R.I. Harris (Estación Tapachula, Chiapas).</i>	50
<i>Figura 11-15 Espectro de potencia de acuerdo al criterio propuesto por el ESDU (Estación Tapachula, Chiapas).</i>	51
<i>Figura 11-16 Espectro de potencia de acuerdo al criterio propuesto por R.I. Harris (Estación Coatzacoalcos, Veracruz).</i>	51

Figura II-17 Espectro de potencia de acuerdo al criterio propuesto por el ESDU (Estación Coatzacoalcos, Veracruz).	2
Figura III-1 Representación grafica de una variable aleatoria (en este caso X esta representada por la velocidad del viento u) durante un lapso de tiempo t	2
Figura III-2 Estructura de 1 grado de libertad, bajo una fuerza de viento $F(t)$	2
Figura IV-1 Mapa de isotacas para un periodo de retorno de 50 años propuesto por la CFE.	2
Figura IV-2 Distribución de presiones para un modelo de un edificio en túnel de viento	2
Figura V-1 Curva probabilística, la cual relaciona el coeficiente de variación y el parámetro k de la distribución Fisher-Tippett II.	2
Figura V-2 Distribución de probabilidades (Estación Ensenada, Baja California Norte).	2
Figura V-3 Distribución de probabilidades acumuladas (Estación Ensenada, Baja California Norte)	2
Figura V-4 Distribución de probabilidades (Estación Tapachula, Chiapas).	2
Figura V-5 Distribución de probabilidades acumuladas (Estación Tapachula, Chiapas).	2
Figura V-6 Distribución de probabilidades (Estación Coatzacoalcos, Veracruz).	2
Figura V-7 Distribución de probabilidades acumuladas (Estación Coatzacoalcos, Veracruz).	2
Figura VI-1 Probabilidad de excedencias, Estación Ensenada, Baja California Sur.	2
Figura VI-2 Probabilidad de excedencias, Estación Tapachula, Chiapas.	2
Figura VI-3 Probabilidad de excedencias, Estación Coatzacoalcos, Veracruz.	2
Figura VI-4 Simulación generada por el programa SYPRE estación Ensenada Baja California factor de rugosidad $k = 0.0050$	2
Figura VI-5 Simulación generada por el programa SYPRE estación Ensenada Baja California factor de rugosidad $k = 0.0150$	2
Figura VI-6 Simulación generada por el programa SYPRE estación Ensenada Baja California factor de rugosidad $k = 0.0500$	2
Figura VI-7 Simulación generada por el programa SYPRE estación Tapachula Chiapas factor de rugosidad $k = 0.0050$	2
Figura VI-8 Simulación generada por el programa SYPRE estación Tapachula Chiapas factor de rugosidad $k = 0.0150$	2
Figura VI-9 Simulación generada por el programa SYPRE estación Tapachula Chiapas factor de rugosidad $k = 0.0500$	2
Figura VI-10 Simulación generada por el programa SYPRE estación Coatzacoalcos Veracruz factor de rugosidad $k = 0.0050$	2
Figura VI-11 Simulación generada por el programa SYPRE estación Coatzacoalcos Veracruz factor de rugosidad $k = 0.0150$	2
Figura VI-12 Simulación generada por el programa SYPRE estación Coatzacoalcos Veracruz factor de rugosidad $k = 0.0500$	2
Figura VII-1 Histograma típico de desplazamientos obtenido con el programa Sypre.	2
Figura VII-2 Distribución de Probabilidades obtenida con el programa SYPRE.	2
Figura VII-3 Anuncio espectacular tipo unipolar	2
Figura VII-4 Curvas de riesgo eólico con un 5% de amortiguamiento Estación Ensenada Baja California Factor de rugosidad $k = 0.0500$	2
Figura VII-5 Curvas de riesgo eólico con un 5% de amortiguamiento Estación Ensenada Baja California Factor de rugosidad $k = 0.0150$	2
Figura VII-6 Curvas de riesgo eólico con un 5% de amortiguamiento Estación Ensenada Baja California Factor de rugosidad $k = 0.0050$	2
Figura VII-7 Curvas de riesgo eólico con un 5% de amortiguamiento estación Tapachula Chiapas factor de rugosidad $k = 0.0500$	2
Figura VII-8 Curvas de riesgo eólico con un 5% de amortiguamiento estación Tapachula Chiapas factor de rugosidad $k = 0.0150$	2
Figura VII-9 Curvas de riesgo eólico con un 5% de amortiguamiento estación Tapachula Chiapas factor de rugosidad $k = 0.0050$	2
Figura VII-10 Curvas de riesgo eólico con un 5% de amortiguamiento estación Coatzacoalcos Veracruz factor de rugosidad $k = 0.0500$	2
Figura VII-11 Curvas de riesgo eólico con un 5% de amortiguamiento estación Coatzacoalcos Veracruz factor de rugosidad $k = 0.0150$	2

Figura VII-12 Curvas de riesgo eólico con un 5% de amortiguamiento estación Coatzacoalcos Veracruz factor de rugosidad $k = 0.0050$	110
Figura VII-13 Curvas de riesgo eólico para una vida útil de 100 años estación Ensenada Baja California Norte.	110
Figura VII-14 Curvas de riesgo eólico para una vida útil de 100 años estación Tapachula Chiapas.	111
Figura VII-15 Curvas de riesgo eólico para una vida útil de 100 años estación Coatzacoalcos Veracruz.	111
Figura VII-16 Curvas de riesgo eólico con un 5% de amortiguamiento $k = 0.0050$ y una vida útil de 20 años	112
Figura VII-17 Curvas de riesgo eólico con un 5% de amortiguamiento $k = 0.0150$ y una vida útil de 20 años	113
Figura VII-18 Curvas de riesgo eólico con un 5% de amortiguamiento $k = 0.0500$ y una vida útil de 20 años	113
Figura VII-19 Pantalla de instalación de SYPRF	116
Figura VII-20 Pantalla de proceso de instalación de SYPRF.	116
Figura VII-21 Como ejecutar SYPRF desde el menú Archivos u. programa.	117
Figura VII-22 Ventana inicial de SYPRF (Lectura de Datos)	118
Figura VII-23 Ventana secundaria de SYPRF (Distribuciones de Probabilidad)	118
Figura VII-24 Ventana de cálculos preliminares de SYPRF (Elección de Estación)	119
Figura VII-25 Ventana de cálculos preliminares de SYPRF (Elección del análisis)	120
Figura VII-26 Ventana de cálculos preliminares de SYPRF (Simulación espectral).	121
Figura VII-27 Ventana de cálculos preliminares de SYPRF (Mensaje de Aviso)	121
Figura VII-28 Ventana de análisis dinámico de SYPRF (Introducción de Datos).	122
Figura VII-29 Ventana de análisis dinámico de SYPRF (Grafico de desplazamientos)	122
Figura VII-30 Ventana de análisis dinámico de SYPRF (Confiabilidad estructural)	123
Figura VII-31 Diagrama de flujo del programa SYPRF	124

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN