

TORMENTAS NO ESTACIONARIAS APLICANDO PROCEDIMIENTOS UTILIZADOS EN REGLAMENTOS Y PROPUESTA EXPERIMENTAL EN TÚNEL DE VIENTO

De Bórtoli, Mario Eduardo¹; Udrizar Lezcano, M. Sandra²; Marighetti, Jorge Omar³

1 Doctor Ingeniero; 2 Maestrando Ingeniero; 3 Msc. Ingeniero

Laboratorio de Aerodinámica – Universidad Nacional Del Nordeste – UNNE

m_debortoli@yahoo.com.ar

RESUMEN

Es un hecho ampliamente documentado que las tormentas eléctricas (thunderstorms-TS) generan en su interior vientos verticales descendentes de elevada velocidad denominados “downburst”. Estos eventos son de corta duración, transitorios, típicamente no estacionarios, espacialmente muy localizados y reportados en accidentes en torres de transmisión de energía eléctrica y aterrizaje y despegue de aviones en aeropuertos.

Sin embargo, el reciente acontecimiento meteorológico acaecido en la provincia de Buenos Aires mostró indicios que sugieren la presencia de este tipo de tormentas en un área densamente poblada.

En este trabajo se presenta un procedimiento para determinar los efectos del viento sobre la estructura adicionando las características transitorias, no estacionarias, manteniendo los conceptos de ráfagas usualmente considerados en los reglamentos de cálculo. Además se exponen resumidamente los recientes desarrollos teóricos y experimentales para reproducir en condiciones controladas estos eventos. Por último se propone un diseño innovador elaborado en la Facultad de Ingeniería de la UNNE, que conservando las virtudes de túneles aerodinámicos de capa límite, y adicionado equipos suplementarios, introduce el carácter transitorio.

Abstract

It is widely documented that thunderstorms (TS) generate inside itself events involving flows of high velocity downdrafts known as "Downburst". These events are of short duration, typically non-stationary, spatially localized and linked with towers of power transmission lines accidents. Considering this event was initially more related to the area of power transmission and prevention of aviation accidents. However, the recent weather event occurred in the province of Buenos Aires suggested some indications of the presence of such storms in a densely populated area.

This paper presents a calculation procedure by adding the non-stationary characteristics, to determine the effects on the structure, keeping the concepts of bursts usually considered in the calculation codes. Also included are recent developments of experimental equipment to reproduce these events under controlled conditions unsteady. We propose an innovative design developed at the Faculty of Engineering UNNE that preserving the virtues of boundary layer wind tunnels, and added additional equipment, introduces the transient characteristic.

1. Introducción

Si bien en las últimas décadas se alcanzó una mejor comprensión de las acciones del viento, la aerodinámica y los efectos asociados a las cargas actuantes sobre las estructuras, se torna cada vez más necesario examinar los modelos actuales sobre los que se basan las normas de diseño y cálculo.

El cálculo de estructuras sometidas a la acción del viento se fundamenta en la hipótesis de que el flujo de aire es generado por condiciones meteorológicas vinculadas a escalas superficiales de grandes dimensiones (*vientos sinópticos*). Así la existencia de otros fenómenos meteorológicos relevantes no es normalmente admitida en códigos y/o normas, aún cuando por ejemplo compañías de energía eléctrica de Estados Unidos, África del Sur, Brasil y Argentina, entre otros, reconocen que las tormentas que causan mayor daño a líneas de transmisión están asociadas a vientos extremos transitorios provocados por desplazamiento de masas de aire descendentes (Vientos TS). Además trabajos de diversos investigadores (Orwig & Schroeder, 2007 ^[1]; Choi & Hidayat, 2002 ^[2]; De Bórtoli y otros, 2009 ^[3]) que señalan que la carga de viento determinada por las normas vigentes no resulta adecuada para eventos TS (Thunderstorms).

Este tipo de fenómeno se produce a partir de corrientes ascendentes de masas de aire, denominados movimientos convectivos, las que posteriormente descienden bruscamente e impactan sobre la superficie. Estos vientos que actúan en tiempos muy breves (fenómenos no estacionarios) y espacialmente muy localizados, resultan en fenómenos de extrema dificultad para su registro.

Los daños causados por vientos TS acontecidos en climas templados son bastante significativos, cabe mencionar el evento ocurrido en el Área Metropolitana de Buenos Aires el pasado mes de abril, que presentó intensas actividad de descargas eléctricas, granizo y precipitaciones en un intervalo de tiempo relativamente breve, características inherentes a las tormentas TS, evento coincidentemente señalado en medios periodísticos como el responsable de los perjuicios provocados.

Ante la evidencia de que estas tormentas suceden y provocan sensibles daños estructurales, resulta necesario implementar un procedimiento de cálculo que incorpore las características propias de las mismas como ser transitoriedad, no-estacionariedad, variación de velocidades en altura, entre otros.

Los reglamentos establecen un procedimiento analítico de cálculo de la acción del viento basado en el Método de Coeficiente de Ráfaga desarrollado por Davenport^[18], aplicable a eventos estacionarios y no-transitorios, denominados vientos de capa límite atmosférica. En este sentido los investigadores Kwon y Kareem ^[4] (2006) proponen un método que manteniendo las bondades del coeficiente de ráfaga de capa límite, incorpora en el análisis las características mencionadas anteriormente. Sin embargo, su aplicación está limitada por la escases de registros de eventos a escala natural y de mediciones experimentales que permitan determinar fidedignamente los coeficientes allí planteados.

En este trabajo se describe la génesis y las características más importantes de las tormentas TS, se mencionan brevemente algunos modelos empírico-analíticos que más se ajustan al contrastarlos con mediciones obtenidas a escala natural y técnicas experimentales para reproducir a escala reducida en condiciones controladas. Asimismo se describe el procedimiento de cálculo propuesto por Kwon y Kareem ^[4] enfatizando las similitudes y diferencias con el procedimiento de cálculo propuesto por Davenport^[18] de viento de capa límite atmosférico, como así también sus limitaciones.

Por último el Laboratorio de Aerodinámica de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) propone un diseño innovador de túnel de viento que conservando las virtudes y el equipamiento utilizado en túneles de viento de capa límite, permita incrementar la escala de simulación combinando flujos de aire verticales y horizontales, y que incluya los efectos transitorios (De Bórtoli y otros, 2009 ^[3]), tendiente a superar las limitaciones en las valoraciones del método presentado.

2. Formación de desplazamientos verticales descendentes de masas de aire

Para que se produzca este tipo de tormenta es preciso que inicialmente se generen movimientos ascendentes de masas de aire. Estos movimientos tienen su origen en dos fenómenos de distinta naturaleza; el primero se produce cuando la masa de aire es más cálida que su entorno, por lo que tiene menor densidad y se genera un empuje vertical ascendente (flotación); el segundo caso se presenta ante el avance horizontal de un frente frío, compuesto de masas de aire densa y en contacto con el suelo, que se desplaza desalojando masas de aire más liviana (cálida) en dirección vertical ascendente con una trayectoria definida por la pendiente de la traza del plano que limita el frente frío con el entorno más cálido que lo rodea (Figura 1) (De Bórtoli y otros, 2008^[5]).

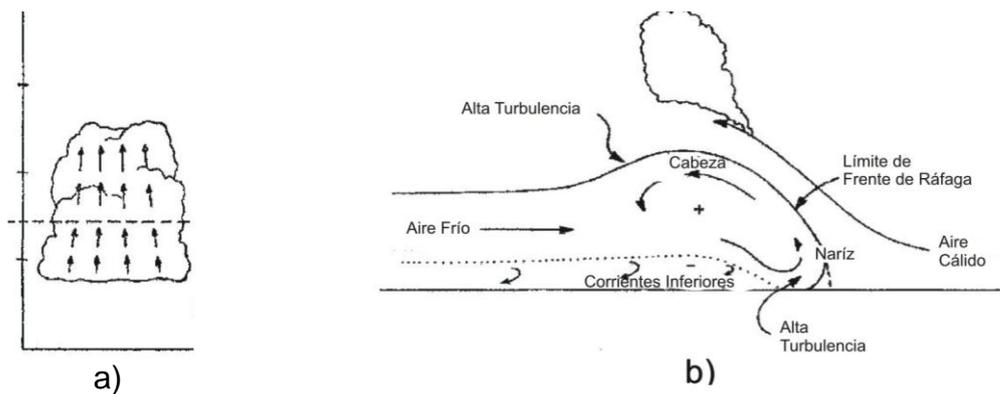


Fig. 1: a) Ascenso de masas de aire por fuerzas de flotación; b) desalojo ante el avance del frente frío (Letchford et al; 2002 ^[6])

Si esta masa de aire ascendente tiene alto contenido de vapor de agua, al elevarse se condensa y libera calor latente que a su vez suministra energía para mantener y acelerar el desplazamiento vertical de las masas de aire, transportándola a alturas superiores a los 10 km. a velocidades entre 10 y 30 m/s. Dadas estas condiciones es posible divisar nubes con gotas de agua que en su ciclo final tienen la figura característica de yunque, evidenciando la formación de nube cumulonimbus. Las gotas de agua al aumentar de tamaño y peso, no pueden ser sostenidas por las corrientes ascendentes, iniciándose de esta manera el descenso de las masas de aire.

Al impactar sobre la superficie, dichas masas de aire se expanden horizontalmente dando origen a remolinos, caracterizados por desarrollarse a baja altura y alcanzar altas velocidades en tiempos cortos, siguiendo una trayectoria radial, dando origen a un fenómeno transitorio.

Estos dos eventos complementarios, desplazamiento vertical descendente por un lado y expansión horizontal de masas de aire por otro, poseen características diferentes, lo que permite efectuar su análisis por separado.

3. Diferencias entre vientos de capa límite y tormentas TS

En flujo turbulento, la velocidad varía irregularmente con el tiempo y el espacio; es, en consecuencia, una práctica común considerar esta variable como la suma de un valor medio constante en el tiempo y una componente fluctuante (turbulencia), descomponiendo la carga en una componente estática y otra dinámica.

Los vientos de capa límite atmosférica se caracterizan por la variación de la velocidad media desde cero, junto a la superficie terrestre hasta la velocidad gradiente, dando origen a una altura denominada Capa Límite Atmosférica (CLA). El perfil de velocidades medias determinado por la variación de la velocidad con la altura permite caracterizar la capa límite atmosférica en función del tipo de terreno sobre el cual se desarrolla el flujo; este perfil representa la variación de la velocidad media desde cero, junto a la superficie terrestre hasta la velocidad gradiente. Se han sugerido diversas leyes para representar dicha variación, siendo las leyes de variación potencial y logarítmica las que tradicionalmente han recibido mayor aceptación. A diferencia de éstos, las tormentas TS (downburst) generan un frente de ráfaga que presenta un perfil de variación de velocidades con la altura con los máximos en proximidades de la superficie (Figura 2).

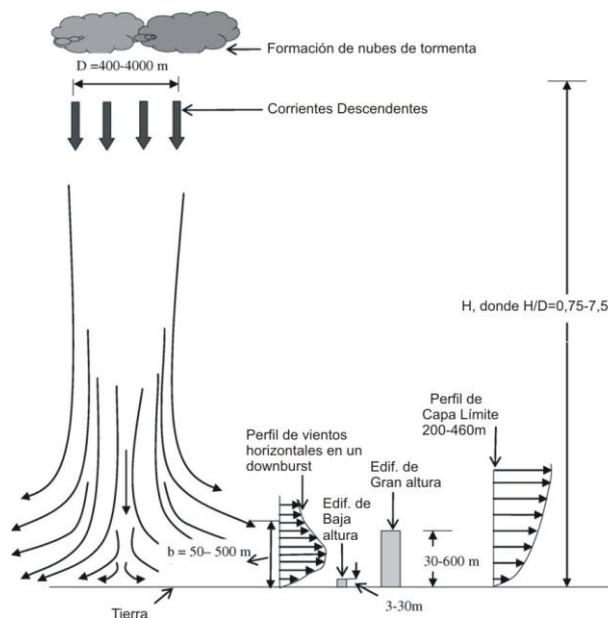


Figura 2: Perfiles verticales de velocidades de tormentas de capa límite y de masas de aire expansivas (Sengupta & Sarkar, 2008^[7])

La expresión analítica que permite asociar parámetros que describen el comportamiento del flujo medio y el de turbulencia en vientos de capa límite es:

$$U(t) = U + u(t) \quad (1)$$

Donde $U(t)$ es la velocidad instantánea del viento, U es la velocidad media y $u(t)$ la componente fluctuante de la velocidad del viento (Figura 3a).
 En tanto que los vientos de frentes de ráfagas, por sus características transitorias y no estacionarias pueden ser representados como:

$$U_{G-F}(z,t) = V_{F-R}(z,t) + u_{F-R}(z,t) \quad (2)$$

Donde $U_{G-F}(z,t)$: vientos del frente de ráfaga no-estacionarios ; $V_{F-R}(z,t)$: componente media variable en el tiempo; $u_{F-R}(z,t)$: componente fluctuante no-estacionaria (Figura 3b).

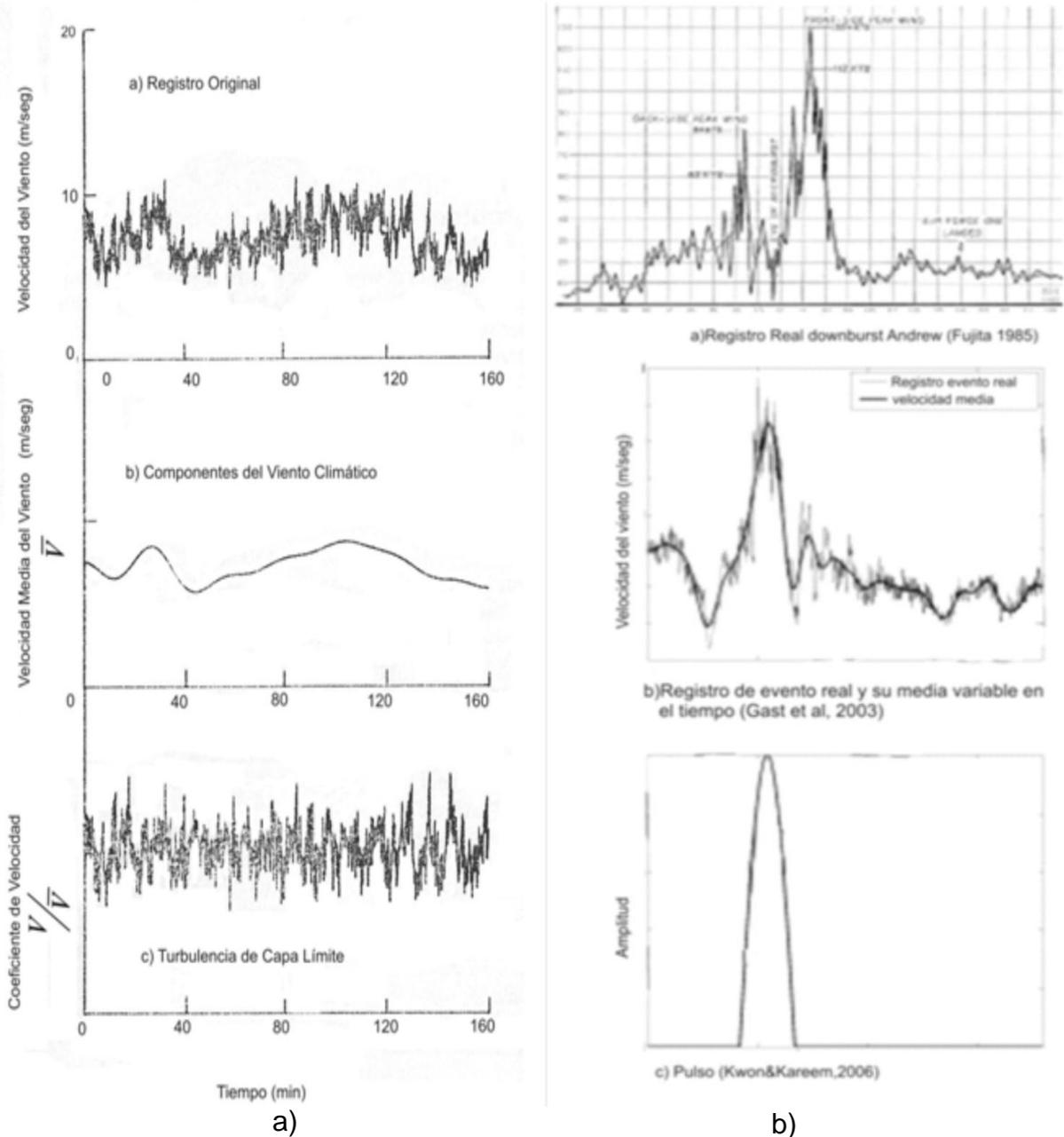


Figura 3: a) descomposición de Vientos de Capa límite (Cook, 1985 [8]); b) Descomposición vientos de frente de ráfaga no-estacionarios (Kwon&Kareem, 2006⁴)

Los vientos generados en las tormentas TS constituyen un reto en la etapa de cálculo de una estructura, fundamentalmente en razón de sus características transitorias (no-estacionariedad, brevedad de su escala temporal) ya que las mismas tornan inapropiados el análisis espectral y técnicas estadísticas empleadas tradicionalmente, que utilizan factores como intensidad de turbulencia, factor de ráfaga, etc. obtenidos a partir de vientos estacionarios con largas escalas temporales; las características transitorias y la falta de datos de campo dificultan adaptar los parámetros de vientos de capa límite a estos eventos transitorios (Kwon&Kareem,2009 ^[9]).

4. Abordaje Analítico

Son varios los modelos numéricos desarrollados para reproducir el campo de velocidades de viento en tormentas eléctricas (Thunderstorms -TS); a modo de ejemplo se pueden citar los modelos de Zhu y Etkin ^[10] (1985), Holmes y Oliver ^[11] (2000) y finalmente Ponte y Riera ^[12] (2007). Otros modelos fueron implementados para describir el perfil vertical de vientos TS, como los modelos de Oseguera y Bowles ^[13] (1988) Vicroy ^{[14],[15]} (1991,1992), citados en el trabajo de Chen y Letchford ^[16] (2004).

El modelo de Vicroy(1991), es un modelo empírico- analítico basado en el modelo de Oseguera y Bowles (1988). El perfil vertical de velocidades se describe por:

$$V_{G-F}(z) = A V_{\max} \left[e^{b_1(z/z_{\max})} - e^{b_2(z/z_{\max})} \right] \quad (3)$$

z_{\max} : altura a la que se produce la máxima velocidad horizontal

b_1 y b_2 son constantes del modelo y valen respectivamente -0.22 y -2.75

V_{G-F} : velocidad horizontal del frente de ráfagas

A: constante del modelo de valor 1,354 (calculada a partir de b_1 y b_2)

Este modelo incluye la siguiente relación implícita, obtenida del modelo TASS ^[13] (Terminal Area Simulation System) que es un modelo numérico climático a gran escala,

$$z_{\max}/z^* = 0,22 \quad (4)$$

Donde z^* es la altura a la cual la velocidad del viento toma un valor igual a la mitad de V_{\max} .

Otro modelo muy difundido es de Holmes y Oliver ^[11] (2000), quienes sugieren un modelo empírico para representar la velocidad horizontal y la dirección del viento en un escurrimiento descendente generado por la suma vectorial de un viento de fondo y un viento radial provocado por la tormenta eléctrica. Este modelo propone dos expresiones diferentes, la primera representa la región donde las velocidades aumentan con la distancia al centro de impacto y la segunda denotan el decaimiento en dirección radial de la velocidad (región anterior y posterior a la zona de estancamiento) a una altura constante, por ejemplo 10 m, incorporando el carácter transitorio. Así, propusieron las siguientes expresiones:

$$V_r = V_{r,\max} e^{\left[-\frac{1}{r}\right]\left(\frac{x}{r_{\max}}\right)} \quad (x < r_{\max})$$

$$V_r = V_{r,\max} e^{\left[-\frac{1}{T}\right] \left\{ -\left[\frac{(x-r_{\max})}{R} \right]^2 \right\}} \quad (x \geq r_{\max}) \quad (5)$$

La constante de tiempo T de 100 s y 500 s antes y después que se desarrollara el pico de velocidad permite determinar contornos de áreas de daños (De Bórtoli y otros, 2008 ^[5]).

Ambos modelos mantienen la limitación de no incluir las componentes verticales y la variación temporal del campo de velocidades.

5. Abordaje Experimental

Para analizar estos fenómenos, de difícil registro debido la pequeña extensión y el corto tiempo del evento, se desarrollaron técnicas para reproducir el flujo en laboratorio.

Aunque la evidencia sugiere que la simulación física y numérica de este tipo de evento se encuadra en el fenómeno de vórtices radiales (vortex ring model), los perfiles de velocidades medias con la altura obtenidos por modelos de simulación de chorro de impacto sobre superficies planas (impinging wall jet model) verificaron similitud con registros de tormentas en escala natural.

Los procedimientos implementados reproducen los desplazamientos de masas de aire verticales descendentes (*Experimentos con fluidos comprimidos, wall jet model*) y el desplazamiento horizontal expansivo de masas de aire (*Experimentos con fluidos utilizando compresores*). Una de las principales dificultades inherentes a ambos procedimientos es que las escalas geométricas obtenidas son sensiblemente inferiores a las usualmente utilizadas en el área de ingeniería de viento estructural, lo que dificulta la construcción de modelos reducidos para ser utilizados en estudios de cargas de viento (De Bórtoli y otros, 2008).

A continuación se presentan resumidamente algunas técnicas experimentales y los equipamientos utilizados.

Una técnica experimental consiste en el suministro en el túnel de viento de aire adicional al escurrimiento de fondo a través de una ranura efectuada en el piso del túnel, introduciéndose masa en forma de chorros, reproduciéndose únicamente la parte frontal del evento, incorporando el efecto transitorio (Lin y otros, 2004 ^[17]).

El laboratorio de Aerodinámica utilizando un arreglo experimental del tipo impinging jet, efectuó una simulación controlada impulsado aire con un ventilador centrífugo guiado por un conducto de 3,4 m de longitud que impacta en forma normal sobre una plataforma de madera. Esta superficie está montada sobre una base regulable perpendicular a la boca de salida del tubo. Se utilizó un tubo de 100mm de diámetro para producir el efecto del “chorro de aire” (wall-jet). Las presiones sobre la superficie de impacto, directamente bajo la salida del tubo, fueron medidas empleando siete tomas conectadas a un transductor de presiones Honeywell. Las muestras fueron adquiridas en forma simultánea a una frecuencia de 500 Hz para cada captura (De Bórtoli y otros, 2009 ^[3]).

La separación entre el conducto y la superficie de impacto z se mantuvo en 483 mm, velocidad del flujo de aire de 33 m/seg. e intensidad de turbulencia del 4%. La relación z/D se adoptó para reproducir el rango de valores de tormentas verticales pequeñas que oscila entre 0,75 y 7,5 de acuerdo a lo afirmado por Sengupta & Sarkar ^[7] (2008) (Figura 4a). Para medir la velocidad a la salida del tubo en el eje central se utilizó un tubo de Pitot-Prandtl y un anemómetro de hilo caliente para

medir las velocidades axiales en el flujo radial como así también el perfil de velocidades a distintas relaciones de X/D. (Figura 4b)

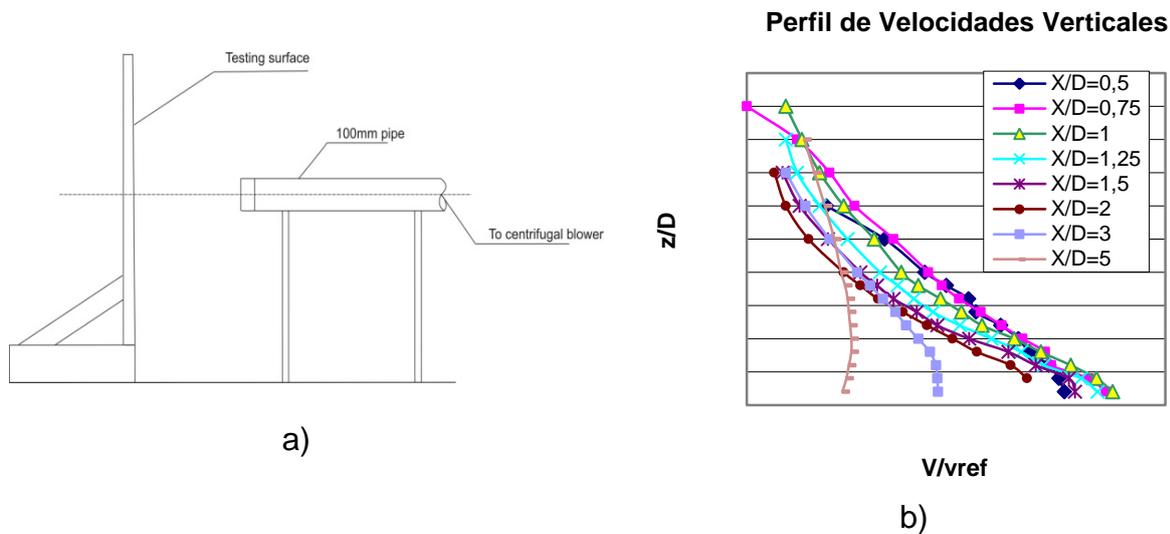


Figura 4: a) Arreglo experimental empleado ; b) Perfil de velocidades Verticales obtenido en el Laboratorio de Aerodinámica –UNNE (De Bórtoli y otros, 2009³).

6. Método de cálculo propuesto por Kwon y Kareem

Como ya se señalara no resulta apropiado emplear métodos de valoración confeccionados para vientos estacionarios para determinar las acciones de vientos generados en tormentas TS; a los fines de capturar las características transitorias y no-estacionarias, los investigadores Kwon y Kareem ^[4] (2006), presentaron un método que denominaron “factor de frente de ráfaga”. Este método tiene como atributo que mantiene la concepción del factor de ráfaga desarrollado por Davenport^[18] (1967), adoptado en la mayor parte de los códigos para determinar la acción de vientos de capa límite. Esta nueva formulación expone una descripción generalizada de los efectos de las cargas del viento sobre las estructuras tanto para vientos de frente de ráfaga como para los vientos de la capa límite.

En los frentes de ráfagas, el perfil de velocidad de capa límite está distorsionado, con velocidad máxima cerca del suelo disminuyendo en altura, exponiendo a las estructuras bajas a cargas potencialmente mayores. Además, un cambio en la cinemática del flujo de aproximación introduce cambios importantes en la interacción fluido-estructura. La no estacionariedad es la característica más crítica de este tipo de vientos que ha sido estudiada por numerosos investigadores empleando registros de eventos reales (Chen & Letchford, 2005 ^[19]; Choi, 2004 ^[20]; Wang & Kareem, 2005 ^[21]).

El método considera que los vientos de frente de ráfaga pueden descomponerse según el siguiente producto:

$$V_{G-F}(z,t) = V_{G-F}(t) \cdot V_{G-F}(z) \quad (6)$$

Donde $V_{G-F}(z,t)$ representa la velocidad del viento del frente de ráfaga; $V_{G-F}(t)$ es la variación media temporal de la velocidad de los vientos no-estacionarios (Figura 3b)

y $V_{G-F}(z)$ introduce la variación espacial que define el perfil vertical de la velocidad (Figura 2).

Se utiliza la expresión empírico-analítica perteneciente al modelo de Vicroy ^[14](3) basado en ajustes efectuados sobre registros adquiridos en aeropuertos o zonas similares, correspondiente a un terreno de categoría de exposición C de la norma ASCE 7 ^[22].

Dado que el modelo del perfil vertical de un downburst presenta velocidades máximas promediadas en cortos intervalos de tiempo puede analizársela como un perfil de ráfagas de vientos de capa límite ($V_{CL,3-s}(z)$). A los efectos de establecer relaciones entre los vientos del frente de ráfaga con los de capa límite se establecen dos criterios:

$$\text{Criterio 1) } V_{\max,C} = \frac{V_{3-s}}{1,354 \left[e^{b_1 \frac{10}{z_{\max,C}}} - e^{b_2 \frac{10}{z_{\max,C}}} \right]} \quad (7a)$$

$$\text{Criterio 2) } V_{\max,C} \approx 1,42 V_{3-s} \quad (7b)$$

El primero establece que las velocidades de ráfaga de capa límite y ráfaga frontal a 10 m de altura son iguales y el segundo considera que la velocidad máxima a la altura gradiente de un viento de capa límite se genera en un frente de ráfaga a 10 m de altura.

Al efecto de conservar la validez de aplicación de las expresiones anteriores para las distintas categorías de exposición contempladas en la norma ASCE 7 ^[22], los autores determinaron los distintos valores de V_{\max} y z_{\max} a partir de la relación establecida en (4), los resultados se presentan en la Tabla 1.

	V_{\max} (m/seg)		z_{\max} (m)
	Criterio 1	Criterio 2	
Exposición A	71,26	45,15	100,58
Exposición B	81,29	51,50	80,47
Exposición C	89,47	56,68	60,35
Exposición D	93,06	58,96	46,94

Tabla 1: V_{\max} y z_{\max} ($V_{3-seg} = 40$ m/seg) (Kwon&Kareem, 2006).

Este procedimiento permite mantener el proceso de cálculo de los vientos de capa límite establecido en los códigos e incorporando los efectos provocados por este tipo de eventos mediante la definición de un factor de carga:

$$F_{\text{Diseño}} = F_{\text{Codig}} \text{ factor} \quad (8)$$

$F_{\text{Diseño}}$ es la carga de diseño en vientos transitorios, F_{Codig} es la recomendación de los códigos de viento y *factor* es el coeficiente de ponderación.

El Factor de carga de ráfaga (FCR) propuesto por Davenport ^[18] para vientos estacionarios está definido por la siguiente expresión

$$G_{FCR} = \frac{\hat{x}_{C-L}(z,t)}{x_{C-L}(z)} \quad (9)$$

$\hat{x}_{C-L}(z,t)$ es el desplazamiento máximo de la estructura; y $x_{C-L}(z)$ es el desplazamiento medio.

Para vientos no-estacionarios el campo de velocidades puede expresarse como

$$U_{F-R}(z,t) = V_{F-R}(z,t) + u_{F-R}(z,t) + V_T \quad (10)$$

Siendo F-R frente de ráfaga; $V_{F-R}(z,t)$ es la velocidad media variable en el tiempo; $u_{F-R}(z,t)$ son los efectos de la turbulencia no-estacionaria y V_T es la velocidad de la tormenta de fondo.

Por tanto, el desplazamiento estructural bajo la acción de vientos de frente de ráfagas puede describirse como un modelo no estacionario:

$$x_{F-R}(z,t) = \bar{x}_{F-R}(z,t) + \tilde{x}_{F-R}(z,t) + x_T \quad (11)$$

Siendo $\bar{x}_{F-R}(z,t)$ desplazamiento producido por la acción de la velocidad media; $\tilde{x}_{F-R}(z,t)$ desplazamiento producido por la turbulencia no-estacionaria y x_T es el desplazamiento producido por la tormenta de fondo (sinóptica). En este modelo el desplazamiento máximo puede ser expresado por

$$\max[x_{F-R}(z,t)] = \max[\bar{x}_{F-R}(z,t)] \left[1 + \frac{\max[\tilde{x}_{F-R}(z,t)]}{\max[\bar{x}_{F-R}(z,t)]} + \frac{x_T}{\max[\bar{x}_{F-R}(z,t)]} \right] \quad (12)$$

Además el máximo desplazamiento provocado por las velocidades medias variando en el tiempo puede expresarse en función del desplazamiento estático $x_{st,F-R}(z)$:

$$\max[\bar{x}_{F-R}(z,t)] = x_{st,F-R}(z) \frac{\max[\bar{x}_{F-R}(z,t)]}{x_{st,F-R}(z)} \quad (13)$$

Así, manteniendo la semejanza con el FCR dado por la expresión (9) se define el *factor* como el cociente entre el máximo desplazamiento del frente de ráfagas y el máximo desplazamiento producido por vientos de capa límite:

$$factor = \frac{\max[x_{F-R}(z,t)]}{\max[x_{C-L}(z,t)]} \quad (14)$$

Reemplazando las relaciones obtenidas anteriormente en la expresión (14)

$$factor = \frac{x_{st,F-R}(z) \frac{\max[\bar{x}_{F-R}(z,t)]}{x_{st,F-R}(z)} \left[1 + \frac{\max[\tilde{x}_{F-R}(z,t)]}{\max[\bar{x}_{F-R}(z,t)]} + \frac{x_T}{\max[\bar{x}_{F-R}(z,t)]} \right]}{x_{C-L}(z) G_{FCR}} \quad (15)$$

Se introduce a continuación una variable y que representa el desplazamiento sin considerar el coeficiente de fuerza de arrastre, debido a que los vientos frontales de ráfaga pueden generar sobre la estructura una distribución de presiones estáticas diferente a los vientos estacionarios, consecuencia de fenómenos aerodinámicos propios de eventos transitorios. Reescribiendo la ecuación (15):

$$factor = \frac{y_{st,F-R}(z)}{y_{C-L}(z)} \frac{\max[y_{F-R}(z,t)]}{y_{st,F-R}(z)} \frac{\left[1 + \frac{\max[y_{F-R}(z,t)]}{\max[y_{F-R}(z,t)]} + \frac{y_T}{\max[y_{F-R}(z,t)]} \right]}{G_{FCR}} \frac{C_{D,F-R}}{C_D} \quad (16)$$

Así el factor podría ser considerado como el producto de cuatro coeficientes que valoran los diferentes aspectos presentes en la interacción fluido- estructura

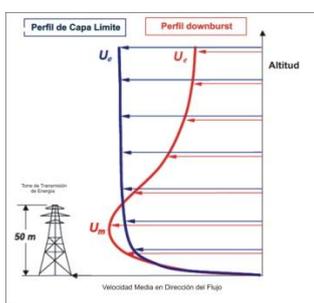
$$factor = I_1 I_2 I_3 I_4 \quad (17)$$

En Figura 5 se presenta un diagrama esquemático que resume la génesis y aplicación del método del coeficiente del frente de ráfagas y la ponderación de cada uno de los coeficientes que definen el *factor*.

Efectos Cinemáticos

(Coeficiente de Presión de Velocidad)

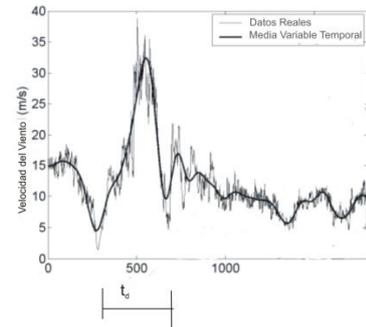
I_1



Efectos Tiempo de subida

(Factor dinámico del Pulso)

$$I_2 = \frac{\hat{R}}{R}$$



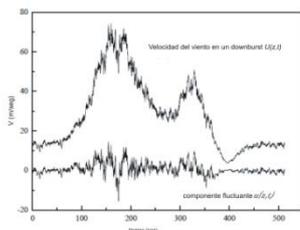
$$F_{Diseño} = F_{Codig} \cdot factor$$

$$factor = I_1 \cdot I_2 \cdot I_3 \cdot I_4$$

Efectos Turbulencia No Estacionaria

(Factor de Dinámica Estructural)

$$I_3 = \frac{\left[1 + \frac{\max[\tilde{y}_{F-R}(z,t)]}{\max[\bar{y}_{F-R}(z,t)]} \right]}{G_{FCR}}$$



Efectos Aerodinámicos Transitorios

(Factor de Modificación de carga)

$$I_4 = \frac{f(C_D; C_M)_{Transitorio}}{f(C_D)_{Estacionario}}$$

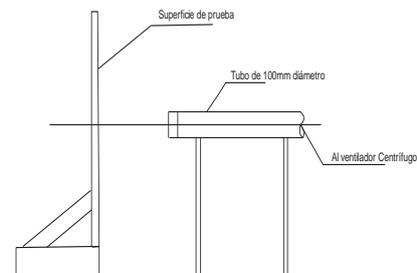


Figura 5: Diagrama esquemático del factor de frente de ráfaga (en base a Kwon&Kareem, 2006 [4])

Siendo:

$$I_1 = \frac{\bar{y}_{st,F-R}(z)}{\bar{y}_{C-L}(z)} \quad \text{Factor de Efecto Cinemático} \quad (18)$$

Este factor describe el efecto de la carga media sobre la construcción en función del cociente entre el perfil de ráfaga frontal y viento de capa límite. Para el primer modo de vibración I_1 puede expresarse como:

$$I_1 = \frac{\int_0^H V_{F-R}^2(z) \phi_1(z) dz}{\int_0^H \left(1/G_q\right) V_{C-L,3-seg}^2(z) \phi(z) dz} \quad (19)$$

Donde H es la altura de la estructura, ϕ_1 es el modo de vibración lineal de la estructura ($\approx z/H$) y G_q es un factor de presión de ráfaga.

El coeficiente I_2 involucra los efectos provocados por el breve tiempo de subida de la velocidad media, manifestado como un pulso de duración finita.

$$I_2 = \frac{\max[y_{F-R}(z,t)]}{y_{st,F-R}(z)} \quad \text{Factor Dinámico del pulso} \quad (20)$$

$$I_2 = \frac{\left[\frac{1}{M_1} \frac{1}{2} \rho B \int_0^H V_{F-R}^2(z) \phi_1(z) dz \right] \left[\text{desplaz. max por } V_{F-R}^2(t) \right]}{\frac{1}{K_1} \frac{1}{2} \rho B \int_0^H V_{F-R}^2(z) \phi_1(z) dz} = \omega_1^2 \max[x(t)] \quad (21)$$

Donde M_1 , K_1 , ω_1 y ϕ_1 y son las masas, rigidez y frecuencia angular del primer modo de vibración respectivamente. La ecuación planteada se resuelve aplicando integral de Duhamel.

El factor I_3 valora el efecto de la turbulencia no-estacionaria, causada principalmente por la componente longitudinal del escurrimiento.

$$I_3 = \frac{\left[1 + \frac{\max[\tilde{y}_{F-R}(z,t)]}{\max[y_{F-R}(z,t)]} + \frac{y_T}{\max[y_{F-R}(z,t)]} \right]}{G_{FCR}} \quad \text{Factor Dinámico estructural} \quad (22)$$

La determinación de I_3 es compleja, la componente de viento fluctuante variable en el tiempo se representa de manera similar a la componente fluctuante del viento de capa límite, en el dominio de la frecuencia, pero mediante un espectro que evoluciona en el tiempo.

Se reemplaza en (22) el desplazamiento producido por la turbulencia no-estacionaria:

$$\max[\tilde{y}_{F-R}(z,t)] = g_{F-R} \max[\sigma_{\tilde{y}_{F-R}}(t)] \quad (23)$$

Donde $\sigma_{\bar{y}_{F-R}}(t)$ es el desvío estándar de la respuesta estructural a la componente fluctuante de la componente longitudinal del viento del frente de ráfaga

$$I_3 = \frac{\left[1 + g_{F-R} \frac{\max[\sigma_{\bar{y}_{F-R}}(t)]}{\bar{y}_{St,F-R}(z)} I_2 + I_T \right]}{G_{FCR}} \quad (24)$$

$\bar{y}_{St,F-R}$ es el desplazamiento estático de $\max[\bar{y}_{F-R}(z,t)]$; I_2 es el factor dinámico del pulso y g_{F-R} es el factor de pico medio.

Este factor de pico es el mismo utilizado por Davenport pero reemplazando el tiempo T por un tiempo equivalente T_{eq} .

Para determinar I_3 es necesario conocer $\sigma_{\bar{y}_{F-R}}(t)$. Para vientos de capa límite atmosférica Davenport propuso la siguiente relación

$$\sigma_{\bar{y}_{C-L}} = \sqrt{\int_0^{\infty} S_{f,C-L}(n) |H_1(n)|^2 dn} \quad (25)$$

Siendo $\sigma_{\bar{y}_{C-L}}$ el desvío estándar de la respuesta estructural a un viento de capa límite, $S_{f,C-L}(n)$ el espectro de fuerza obtenido como el producto del espectro de velocidad de viento normalizado por la admitancia aerodinámica y $|H_1(n)|$ la función de transferencia de la estructura.

Manteniendo la analogía de viento atmosférico con vientos de frente de ráfaga, se obtiene

$$\sigma_{\bar{y}_{F-R}}(t) = \sqrt{\int_0^{\infty} S_{f,F-R}(n,t) |M(n,t)|^2 dn} \quad (26)$$

Siendo $S_{f,F-R}(n,t)$ el espectro de fuerzas ante un viento de frente de ráfagas, y $M(n,t)$ la función de modulación temporal. Resta ahora determinar una función de modulación en el tiempo de la estructura expuesta a una función pulso que en este caso es referida al tiempo de duración del pico de velocidad de la tormenta t_d . Esta función de modulación se obtiene como la respuesta para un grado de libertad de una función de excitación correspondiente a un proceso aleatorio Gaussiano montado en una función pulso de duración t_d .

Para obtener el desvío estándar de la respuesta estructural a la componente fluctuante del viento del frente de ráfaga, es necesario obtener previamente el espectro de fuerza correspondiente al viento en este tipo de evento. Se procede para ello de manera similar a la descomposición en el dominio frecuencial de los vientos de capa límite.

El espectro de las fuerzas provocadas por el viento fluctuante del frente de ráfaga, se expresa en términos del concepto de evolución del espectro.

El espectro de fuerzas de la respuesta a la componente fluctuante en frente de ráfagas esta dado por la siguiente expresión

$$S_{f,F-R}(n,t) = (\rho_a c_1)^2 S_{u,s}(n) V_{F-R}^4(t) \int_0^H \int_0^H V_{F-R}^2(z_1) V_{F-R}^2(z_2) R_x(z_1, z_2, n) R_z(z_1, z_2, n) \phi_1(z_1) \phi_1(z_2) dz_1 dz_2$$

$$S_{f,F-R}(n,t) = (\rho_a c_1)^2 S_{u,s}(n) V_{F-R}^4(t) |J_{z1}(n)|^2 |J_{x1}(n)|^2 \quad (27)$$

Donde $S_{u,s}(n)$ corresponde al espectro normalizado de la componente fluctuante longitudinal de viento de capa límite y R_x y R_z son las funciones de coherencia de las componentes en las direcciones verticales y horizontales de los vientos de capa límite y ϕ_1 es el modo natural de vibración. La integral obtenida define las funciones conjuntas de la amplificación de la fuerza por sus correlaciones espaciales y la amplitud por las características dinámicas de la estructura.

El factor I_4 valora la potencial modificación de la carga ante la variación de la respuesta aerodinámica de las estructuras frente a la acción de un evento transitorio.

$$I_4 = \frac{C_{D,F-R}}{C_D} \quad \text{Factor de Efecto Aerodinámico Transitorio} \quad (28)$$

El modelo lo considera igual a la unidad en razón del incipiente desarrollo en la implementación de técnicas experimentales adecuadas para valorar los efectos aerodinámicos transitorios en túnel de viento. Esto constituye una limitación relevante dado que los primeros ensayos realizados en túnel de viento, sobre formas estructurales regulares y simples expuestos a desplazamientos de masas de aire con características transitorias y variación de velocidades medias con la altura similar al provocado por un frente de ráfagas, denotaron que los coeficientes aerodinámicos son hasta un 20% mayor a los obtenidos para viento de capa límite (Kwon & Kareem, 2006^[4]).

A continuación se reproduce el ejemplo de aplicación del método presentado por Kwon y Kareem^[4], para un edificio de 200m de altura, con ancho y profundidad de 40m, frecuencia natural de 0,2Hz, de acuerdo al perfil de velocidades verticales del modelo de Vicroy $V_{max} = 57$ m/seg y $z_{max} = 60$ m; duración del pulso $t_d = 5 - 200$ seg, condición de exposición C y adoptando para I_4 el valor unidad (Tabla 2).

T_d (seg)	Criterio 1				Criterio 2			
	I_1	I_2	I_3	$I_2 I_3 I_4$	I_1	I_2	I_3	$I_2 I_3 I_4$
5	5,86	1,06	0,85	0,90	2,35	1,06	0,86	0,92
10		1,01	0,90	0,91		1,01	0,92	0,93
100		1,00	1,04	1,04		1,00	1,05	1,05
200		1,00	1,07	1,07		1,00	1,08	1,08

Tabla 2: Efecto cinemático I_1 y efectos dinámicos ($I_2 I_3 I_4$) sobre un edificio en exposición C (Kwon & Kareem, 2006^[4])

El procedimiento de cálculo para obtener la respuesta estructural ante la incidencia de vientos de frente de ráfagas que incorpora las características transitorias y no estacionarias del viento atmosférico propuesto por Kwon y Kareem^[4] tiene dos limitaciones a saber: en primer término el coeficiente I_4 es valorado como la unidad

como ya se mencionara, y en segundo lugar este modelo solamente evalúa la componente longitudinal de la velocidad del viento en el frente de ráfaga, excluyendo los efectos provocados por la componente vertical del viento atmosférico en el lugar del impacto de las masas de aire verticales con la superficie. En este sentido, existen tipos de estructuras particularmente sensibles a esta componente, como ser líneas de transmisión de energía eléctrica, puentes, aviones en el momento de aterrizaje, cubiertas livianas de grandes superficies sin columnas intermedias, entre otras.

7. Alternativa de simulación en túnel de Viento

La Facultad de Ingeniería de la UNNE implementó el diseño de un túnel de viento que permite superar las dos restricciones señaladas en el modelo de valoración descrito. Simultáneamente este diseño aborda satisfactoriamente la limitación indicada anteriormente en relación a la dificultad inherente común a los equipamientos experimentales reportados en bibliografía, de generar en condiciones controladas la reproducción de este tipo de eventos en forma completa logrando escalas que permitan ser utilizadas en ensayos con modelos reducidos en túnel de viento e incluir la transitoriedad del fenómeno.

A continuación se exponen los fundamentos para diseñar un túnel de viento, que manteniendo los conceptos desarrollados en los de capa límite, reproduzca en condiciones controladas desplazamientos de masa de aire verticales descendentes trasladadas por tormentas de fondo horizontal.

La reproducción de vientos atmosféricos fuertes en atmósfera neutralmente estable en escala reducida en túnel de viento, con un campo de velocidades medias y fluctuantes que contrasten adecuadamente con las mediciones en escala natural, requirió túneles en los que las masas de aire se desplacen sobre rugosidades superficiales colocadas en el piso (Garrtshore y De Cross, 1977 ^[23]) dimensionadas en función del tipo de perfil deseado generando una nueva concepción de túneles de viento denominados túneles de viento de capa límite de baja velocidad.

El túnel de viento de la Facultad de Ingeniería con una longitud de cámara de ensayo de 18 metros obtuvo mediante ese procedimiento un espesor de simulación de 57 cm, con una escala de simulación de 1/500.

Para obtener escalas mayores Cook (1978), Counihan (1969), Standen et al (1969) y Natalini y otros (1998) desarrollaron las técnicas llamadas de rugosidad, de barrera y dispositivo de mezcla (RBMD) para reproducir el flujo de Capa Límite (CL) en su totalidad (Figura 6). El concepto subyacente era el de aumentar la escala de simulación, aumentando el espesor del perfil de velocidad.



Figura 6: Método de Simulación ABL (De Bórtoli y otros, 2009).

Para obtener escalas geométricas mayores destinadas a reproducir estructuras bajas fue necesario introducir el concepto de simulación parcial. Así, efectuando ligeras modificaciones al equipamiento utilizado en las técnicas anteriormente

mencionadas, Cook reprodujo sólo la parte inferior de la capa límite atmosférica, aumentando la escala de simulación, desarrollando un procedimiento que de forma independiente del espesor de la capa límite simulada obtiene el factor de escala de simulación (Cook, 1977/1978). En este método los parámetros fluctuantes de la misma son escalados linealmente con datos atmosféricos, definiendo un rango de altura útil de simulación (De Bórtoli y otros, 2002).

Manteniendo la concepción tradicional de diseño de túnel de viento de capa límite el equipamiento más simple y que logra reproducir de manera completa el evento de masas de aire descendentes es un ventilador colocado paralelo a la superficie.

La reproducción completa del fenómeno implica convertir dimensiones expresadas en kilómetros a dimensiones coherentes con los equipos de los túneles de viento, lo que se traduce en escalas de simulación muy reducidas. Para obtener mayores escalas se podría aumentar el tamaño de los equipamientos o bien retomar el concepto de simulación parcial aplicado en túnel de viento de capa límite. La primera conduciría a dimensiones de ventilador que resultaría en una solución impracticable. Respecto a la segunda, Lin ^[7] (2004) introduce en desplazamientos verticales descendentes la concepción de simulación parcial, introduciendo chorros de masas de aire a través de ranuras colocadas en el piso, en un túnel de viento de capa límite, pero limitando en esta reproducción solamente la parte frontal horizontal del escurrimiento. Esta simulación parcial incorpora la característica transitoria del evento pero no reproduce las componentes verticales del viento de ráfaga frontal y tiene el inconveniente que las características cinemáticas de la simulación obtenida son sensiblemente modificadas en función del tiempo de apertura de la ranura horizontal.

Analizando la interacción fluido-estructura, es posible observar que debido a los diferentes órdenes de magnitud asociadas a las dimensiones de la estructura y del evento atmosférico, no es necesario reproducir el evento completo (Figura 7).

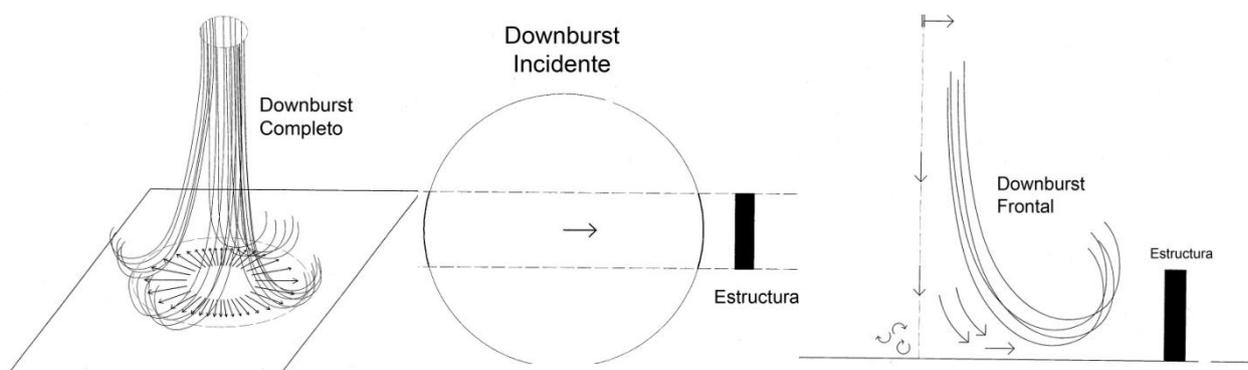


Figura 7: Reproducción parcial del evento (De Bórtoli y otros, 2009 ^[3]).

De este análisis es posible relajar la exigencia de reproducir el evento completo, pudiéndose simular la parte del evento contenido en el plano bidimensional de la estructura sin que esto genere distorsiones significativas en los resultados. Con esta primera restricción se dispondría de mayor masa de aire para generar la variación espacial en altura del frente de ráfaga, pero aún mantiene la concepción de un equipamiento que reproduce la altura total del perfil de velocidades.

Desde un punto de vista estructural, importa la acción de las máximas velocidades de aire, por ello es viable mantener el concepto de espesor útil de simulación. Esto último permitiría aumentar la escala de los modelos debido que solamente se debe

generar en escala la parte del escurrimiento que contiene a las máximas velocidades, descartando la parte superior del perfil.

Mediciones en escala natural reportaron que las máximas velocidades se produjeron en alturas que varían desde los 5 hasta 80 metros de altura (Fujita, 1985 ^[29]). Como esta variación en altura hasta el momento no fue posible relacionarla de manera precisa con la variación de la rugosidad superficial, contenido turbulento del chorro descendente, diámetro del chorro, condiciones climáticas, entre otras, es necesario que el modelo de reproducción adoptado tenga la posibilidad de variar en un entorno la altura donde se reproduce la máxima velocidad.

8. Descripción de la nueva concepción de Túnel de Viento

Se expone la concepción de un túnel de viento de circuito abierto que reproduce desplazamientos verticales descendentes de masas de aire trasladadas por tormentas extratropicales correspondientes a eventos sinópticos en atmósfera neutralmente estable.

En general las partes que lo constituyen mantienen la secuencia espacial de la concepción tradicional del túnel de viento de capa límite, pero diferenciándose en que este túnel funcionaría a presión atmosférica. El desplazamiento de las masas de aire en la dirección horizontal se inicia, a diferencia de los túneles de viento de capa límite de circuito abierto, con el ventilador axial ubicado al inicio de la cámara de ensayo, en un plano vertical al piso.

A continuación se coloca la transición que tiene una doble finalidad. La primera es disminuir la rotación del flujo a la salida del ventilador, estando constituida por anillos concéntricos, que al ser cortados por barreras a lo largo de la transición impiden el desarrollo del flujo rotacional y la segunda es pasar de una sección circular a una rectangular.

Posteriormente se coloca el panel de abejas, constituidos por tubos rectangulares cuya función es homogenizar las características del escurrimiento, intercalado con mallas transversales y por último se ubica el equipamiento señalado anteriormente para reproducir escurrimientos de capa límite.

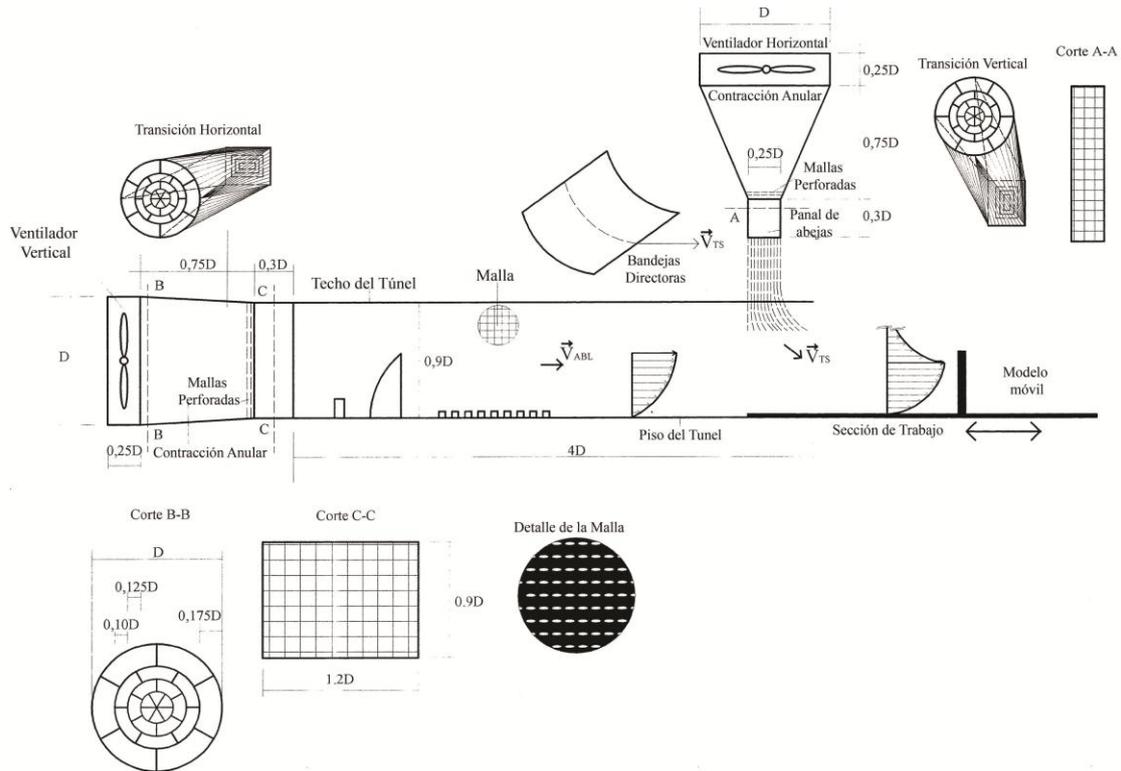


Figura 8: Diseño conceptual y diagrama esquemático (De Bórtoli y otros, 2009 ^[3]).

Respecto al escurrimiento vertical descendente, en la primera parte el equipamiento es idéntico al diseñado para reproducir el escurrimiento horizontal.

La diferencia consiste en la introducción de las bandejas directoras para insertar el concepto de espesor útil de simulación. Estas poseen curvaturas graduales y tienen por finalidad guiar las trayectorias de las masas de aire a alturas convenientes, con distintas secciones de paso para generar un gradiente de velocidades semejante al observado en eventos reales.

Así, el equipamiento propuesto tiene la posibilidad de variar la trayectoria de las masas de aire dirigidas por las bandejas directrices a través de un movimiento regulado en su tercio inferior para adaptar la inclinación de las mismas a las necesidades específicas del evento analizado.

Además como la primera guía de escurrimiento es vertical, se reduce la reproducción del evento a la situación de downburst frontal planteada en Figura 7, materializando el concepto de altura útil de simulación.

La malla que establece el contorno de las paredes del túnel de viento es permeable, para permitir el ingreso de la presión atmosférica, pero lo suficiente cerrada para evitar que el flujo se disperse.

Por último, para introducir la característica de no estacionariedad la mesa de ensayo puede desplazarse a lo largo de la cámara de ensayo, reproduciendo así el desplazamiento de la tormenta vertical por un escurrimiento de fondo.

9. Conclusiones

Las características propias de los vientos provocados por desplazamientos verticales descendentes de masas de aire montadas en tormentas extratropicales, como ser transitoriedad, no-estacionariedad, acción muy localizada, dificultan la obtención de registros de estos eventos naturales.

Dada la insuficiencia de datos es necesario sistematizar el procedimiento de valoración de carga, para generar una base de datos tendiente a definir comunes denominadores que permitan unificar criterios utilizados en los códigos de viento. Por ello es necesario desarrollar técnicas de simulación experimental y numérica para obtener información en una manera sistemática y económica, respecto a la interacción de estos eventos con estructuras.

En este sentido se presentó un método de valoración que si bien incluye sustanciales mejoras mantiene la limitación de no estimar un factor definido en el procedimiento y que cuantifica la distorsión en los coeficientes aerodinámicos provocados por la transitoriedad del fenómeno.

Esta limitación responde a la imposibilidad de reproducir estos eventos en condiciones controladas en escala adecuadas a estudios en modelos reducidos en las técnicas experimentales hasta ahora presentadas.

Para superar estas dificultades se expuso una nueva concepción de túnel de viento basado en conceptos aplicados a los túneles de capa límite y en las características propias del evento a reproducir.

10. Referencias

- [1]- Orwig, K.D.; Schroeder, J.L.(2007):"Near-surface wind characteristics of extreme thunderstorm outflows". *Journal of Wind Eng. and Industrial Aerod.* 95 565–584.
- [2]- Choi, E. C. C., Hidayat, F.A. (2002):"Gust factors for thunderstorm and non-thunderstorm winds". *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 90, 1683–1696.
- [3]- De Bórtoli, M.; Marighetti, J.; Udrizar Lezcano, M. S.(2009); "Strong Atmospheric Wind Over Electric Transmission Tower Approaching", 12-14 de julho, Bento Gonçalves – Brasil.
- [4]- Kwon, D., Kareem, A. (2006):"Gust-front factor." *NatHaz Modeling Laboratory Report*, University of Notre Dame.
- [5]- De Bórtoli Mario, Ponte Jacinto, Jr., Riera Jorge, Marighetti Jorge, Udrizar Lezcano, M. Sandra (2008): "Sobre la caracterización de vientos producidos por tormentas eléctricas y su utilización en Ingeniería"; *Proceedings 1º Jornadas Sudamericanas de Ingeniería del Viento* Montevideo, Uruguay, Publicado en CD.
- [6]- Letchford, C.W.; Mans, C.; Chay, M.T.(2001):"Thunderstorms—their importance in Wind Engineering, a case for the next generation wind tunnel", *JAWE* 89 31–43
- [7]- Sengupta, A., Sarkar, P.P.(2008):"Experimental measurement and numerical simulation of an impinging jet with application to thunderstorm microburst winds". *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 96, (3), 345–365.
- [8]- Cook, N.J. (1985):"The Designer's Guide to Wind Loading of Building Structures", *Building Research Establishment Report*, London, Butterworths.
- [9]- Kwon, D. and Kareem, A. (2009). "Gust front factor: New framework for wind load effects on structures", *J. Struct. Eng.*, 135, 6, 717-732
- [10]- Zhu, S.; Etkin B. (1985): *Model of the wind field in a downburst*. *J. Aircr.* 22 pp. 595–601
- [11]- Holmes, J. D.; Oliver, S. E. (2000):"An empirical model of a downburst". *Engineering Structures*; 22, 1167-1172.
- [12]- Ponte Jr., J.; Riera, J. D. (2006): "Wind velocity field during thunderstorms". *Wind and Structures*.
- [13]- Oseguera R.M., Bowles R.L (1988), "A simple analytic 3-dimensional downburst model based on boundary layer stagnation flow", *NASA Technical Memorandum* 100632.

- [14]- Vicroy D.D. (1991), "A simple, analytical, axisymmetric microburst model for downdraft estimation", NASA Technical Memorandum 104053.
- [15]- Vicroy D.D. (1992), "Assessment of microburst models for downdraft estimation", *Journal of Aircraft*, 29(6), 1043-1048.
- [16]- Chen, L.; Letchford, C. W. (2004): "A deterministic–stochastic hybrid model of downbursts and its impact on a cantilevered structure". *Eng. Structures* 26 619–629.
- [17]- Lin, W E; Novacco, C; Savory, E. (2004): "Transient simulation of a microburst outflow: Review and proposed new approach", *CSME Forum*, Kananaskis, Calgary, Canada.
- [18]- Davenport, A.G.,(1967): "Gust Loading Factors," *Journal of the Structural Division*, *Proceed. of the American Soc. of Civil Eng.*, Vol. 93, No. ST3, pp. 11 – 34.
- [19]- Chen, L., and Letchford, C.W. (2005). "Proper orthogonal decomposition of 2 vertical profiles of full-scale nonstationary downburst wind speeds", *J.W.E.I.A.*, 93, 187-216
- [20]- Choi, E.C.C. (2004). "Field measurement and experimental study of wind speed profiles during thunderstorms", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 92, 275-290
- [21]- Wang L. and Kareem, A. (2005). "Modeling and simulation of transient winds in downbursts/hurricanes" *Proc. 10th Americas Conf. on Wind Engineering*, Baton Rouge, LA.
- [22]- ASCE 7 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures-American Society of Civil Engineers
- [23]- Garrtshore, I.S.; De Croos, K.A.(1977): "Roughness element geometry required for wind tunnel simulations of the atmospheric wind", *Transactions of the ASME, New York. Journal of Fluids Engineering. Volume 99. Serie Y.*
- [24]- Cook, N.J. (1978): "Wind-tunnel simulation of the adiabatic atmospheric boundary layer by roughness, barrier and mixing-device methods", *JWEA*. 3 157–176.
- [25]- Counihan, J. (1969): "An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel", *Atmos. Environ.* 3 197–214.
- [26]- Campbell, G.S.; Standen, N.M. (1969): "Simulation of Earth's surface winds by artificially thickened wind tunnel boundary layers", *Progress Report II, NAE Report LTR-LA-37, National Aeronautical Establishment, Canada.*
- [27]- Cook, N.J. (1977/1978): "Determination of the model scale factor in wind-tunnel simulations of the adiabatic atmospheric boundary layer", *J.W.E.I.A.* 2 311–321.
- [28]- De Bórtoli, M.; Natalini, B.; Paluch, M. J.; Natalini, M. B.(2002): "Part-Depth Wind Tunnel Simulations of the Atmospheric Boundary Layer", *JWEIA*, 90 pp. 281-291.
- [29]- Fujita, TT. (1985): "The Downburst. Report of Projects NIMROD and JAWS", University of Chicago.