

EL IMPACTO DE LA INGENIERÍA DEL VIENTO SOBRE EL DESARROLLO SOSTENIBLE

Julio Marañón Di Leo, CTA/UIDET LaCLyFA (Centro Tecnológico Aeroespacial/UIDET
Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La
Plata, jmaranon@ing.unlp.edu.ar

Juan Sebastián Delnero, CTA/UIDET LaCLyFA (Centro Tecnológico Aeroespacial/UIDET
Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La
Plata, delnero@ing.unlp.edu.ar

Resumen— Es reconocida a nivel mundial la rama de la ingeniería conocida como Ingeniería del Viento. Esta es una rama de la ingeniería que involucra una gran variedad de aspectos relativos a los efectos del viento sobre todo elemento que se encuentre en las proximidades del suelo terrestre. En particular, en este nivel bajos de altitud los cuerpos se encuentran sometidos a los efectos del viento que presenta una configuración particular descrita por lo que denominamos en fluidodinámica la capa límite, y específicamente aquella que involucra al suelo terrestre denominada la baja capa límite atmosférica turbulenta. La temática involucrada es muy amplia y variada, en vista de ellos nos proponemos, en este trabajo, presentar las actividades experimentales en túnel de viento que realiza nuestro grupo de investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, mostrando trabajos con resultados concretos que aportan al entendimiento de los fenómenos involucrados que inciden fundamentalmente en el desarrollo sostenible y sus efectos sobre el hábitat y las personas. En particular hacemos hincapié en los efectos que produce la turbulencia del viento sobre distintos aspectos involucrados, por ejemplo, en edificaciones, la generación de energía eólica, el confort eólico urbano, la dispersión de contaminantes, etc. A partir de estos estudios se busca la resolución de las problemáticas involucradas en las distintas áreas mencionadas.

Palabras clave— *Ingeniería del Viento, Turbulencia, Desarrollo sostenible.*

1. Introducción

La mayoría de los ecosistemas terrestres se alojan en los fluidos constituyentes de la atmósfera y los mares, lagos y ríos. Para el ser humano, el hábitat natural está conformado por la atmósfera, que cobija sus asentamientos, permitiéndole desarrollar todas sus actividades. Por ello es sorprendente el escaso rigor científico aplicado al manejo de las relaciones que se plantean entre los atributos de la atmósfera y el ser humano, sus asentamientos y actividades. Y más sorprendente aún es la negligencia e ignorancia con que se consideran muchas de esas relaciones, esenciales para la calidad de vida humana, en problemas de urbanismo y arquitectura.

Personas, viviendas y poblados están envueltos por la atmósfera y por ello el hombre percibe la realidad a través de ese fluido, es decir, condicionada por el mismo. Las

impresiones alcanzan nuestros sentidos casi exclusivamente por ese fluido portante y condicionante a la vez. En el campo visual, la nitidez y matices de colores y formas percibidas dependerán, en gran parte, de la naturaleza del aire que se interpone entre el objeto y el observador. De modo similar, la atmósfera posibilita la percepción olfativa, así como la acústica, la térmica, la táctil o la kinestésica, tanto en las facetas positivas como negativas. Todos conocemos la caricia de la brisa frente al mar o al lanzarnos al galope, sensaciones cantadas por los poetas; pero todos hemos sufrido la impresión terrible del viento gélido, de la lluvia fría o de la nevisca en la cara o hemos soportado la opresión agobiante de la calma calurosa y húmeda de una tarde estival.

Resultará de interés enumerar ciertos parámetros climatológicos y observar su relación con cualidades de la atmósfera (Tabla 1). Esta incompleta enumeración nos muestra que ciertos parámetros intervienen en la determinación de diferentes aspectos de las cualidades de la atmósfera y que los atributos de esos parámetros se refuerzan o contrarrestan según los casos. Su incidencia simultánea produce una sensación de conjunto que nos permite una evaluación psicológica de la calidad climática del lugar.

Tabla 1. Comparación entre parámetros climatológicos y cualidades de la atmósfera [1].

PARÁMETROS CLIMATOLÓGICOS	CUALIDADES DE LA ATMOSFERA
Distribución de la luminancia Nivel de iluminación Lectura de colores y de forma	Calidad visual
Nivel acústico Distribución de frecuencias Variación en el tiempo	Calidad acústica
Partículas Gases	Calidad higiénica y olfativa
Velocidad del viento Espectro de turbulencia	Calidad dinámica
Temperatura Radiación térmica	Calidad térmica
Humedad Ionización	Calidad eléctrica

Centraremos ahora nuestro interés en los parámetros climatológicos ligados al viento, lo que nos permitirá evaluar la percepción eólica. Esta es muy compleja ya que el fenómeno se verá modificado por las cualidades climáticas del viento y, simultáneamente, por factores personales que hacen a la naturaleza de cada individuo receptor y por las condiciones culturales, socioeconómicas y tecnológicas en las que se halla inmersa la sociedad. Citaremos ahora algunas de las cualidades de la atmósfera desde el punto de vista eólico, así como ciertos factores que intervienen en su determinación (Tabla 2).

A partir de ello y recordando que la parte más significativa de la percepción ambiental acontece en el área en que se vive y particularmente en el espacio entre los edificios que se habita, que podemos llamar "entorno habitacional colectivo o común", es clara la importancia del control del clima y en especial del factor eólico en ese entorno, para posibilitar la riqueza de sensaciones y la mayor oportunidad de recibirlas.

Pero a medida que el clima es más riguroso, ese espacio entre los edificios suele ser más pobre e inhóspito. Por ello, en esos climas se siente la necesidad compensadora de

enriquecer detalles, amenidad y confort del interior de las viviendas, lo que no basta porque es en los espacios entre edificios en los que se logra la mayor parte de las percepciones sociales.

Tabla 2. Cualidades eólicas de la atmósfera y los factores intervinientes [1].

CUALIDADES EÓLICAS DE LA ATMÓSFERA	FACTORES INDIVIDUALES	FACTORES GENERALES
Cualidades térmicas	Stress Estado de salud Ritmo vital diario	Velocidad del viento Temperatura del aire Humedad del aire Radiación térmica Vestimenta Nivel de actividad
Cualidades dinámicas	Edad Estado físico Discapacidad	Velocidad del viento Turbulencia Tipo de actividad
Cualidades higiénicas y olfativas	Estado de salud	Velocidad del viento Tipo de particulado Tamaño de particulado Gases Turbulencia
Cualidades acústicas	Receptividad	Velocidad del viento
Cualidades psicológicas	Estado de ánimo Acostumbramiento Receptividad	Seguridad Identidad Variación

Sin embargo, la conjunción de viento, frío y humedad es la que mantiene al individuo en el interior. Corregir estos inconvenientes para aumentar la riqueza de percepciones sociales no es fácil puesto que los factores climáticos que determinan la esterilidad del ambiente y la retracción del habitante son poco controlables artificialmente. Afortunadamente, el viento es uno de los factores climáticos que presenta mayores posibilidades de manejo. Mediante adecuados estudios fluidodinámicos es posible cambiar su naturaleza o desviarlo, así como reparar ciertos espacios de su acción directa. Esas medidas actúan también favorablemente en relación con el desarrollo de la flora y la fauna.

Hemos de ocuparnos en este trabajo justamente de esas técnicas, que en otros países han sido convenientemente desarrolladas [2]. Debe tenerse presente que las mismas pueden aplicarse además a otros campos de importancia como el control de la erosión, el mejoramiento de los cultivos, el ahorro y generación de energía.

2. Consideraciones sobre el efecto del viento

2.1 Los efectos del clima

Las condiciones meteorológicas expresan el estado de un sector de la atmósfera en un instante determinado, por la acción de: la temperatura, humedad, presión, nubosidad, radiación solar, precipitaciones, viento, etc. Aunque puede haber grandes variaciones en las condiciones meteorológicas, las estadísticas demuestran que los valores promedio en un lugar determinado mantienen una sorprendente constancia en el tiempo. Los parámetros de los fenómenos meteorológicos varían a lo largo del año con: la ubicación geográfica, los procesos que se dan en

la atmósfera libre (algunos centenares de metros por sobre la corteza terrestre), las alteraciones locales por la naturaleza y materiales constitutivos de la superficie del planeta: topografía, vegetación, edificación, etc.

Esas variaciones locales pueden condicionarse y modificarse en parte mediante el tratamiento adecuado del agrupamiento y forma de los edificios e instalaciones, así como de sus materiales y el terreno circundante. Las condiciones climáticas pueden definirse en diversos escalones según la extensión que involucran. De esta manera tenemos un clima regional (área de decenas de kilómetros de diámetro) que son influenciados por: las características de absorción y reflexión del terreno, la red hidrográfica y lacustre, la configuración y rugosidad del relieve, la altura sobre el nivel del mar, la estructura y distancia a la costa y la vegetación existente. Luego tenemos un clima local (área de algunos kilómetros de diámetro), que es condicionado por la presencia de un desarrollo urbano, se convierte en un clima urbano, cuyos factores de influencia son: la topografía, la extensión y naturaleza del área edificada, la vegetación y las condiciones hidrográficas y lacustres. Dentro del mismo se puede mencionar un clima local, por proximidad, en el entorno habitacional, recreativo, laboral, etc. de un área urbana. Con influencias por el agrupamiento y orientación de edificios, instalaciones y plantaciones que los rodean, y de otros elementos como acequias, estanques, etc. Por último, se puede mencionar un microclima (área de unos pocos metros de diámetro), influenciado por la naturaleza y forma de edificios e instalaciones, la relación espacial entre ellos y con las vías de circulación circundantes, y la distribución de velocidades, presiones, temperaturas, humedad, etc, provocada por la aerodinámica de edificios e instalaciones; la vegetación; los cercos y vallados, etc. [1]

En espacios relativamente reducidos pueden generarse condiciones climáticas muy disímiles y severas, aquellos actores que intervienen en el diseño arquitectónico y urbano deben estudiar cuidadosamente los efectos climáticos en los distintos escalones, particularmente si se trata de climas extremos. Así, clima y edificación interactúan permanentemente en forma biunívoca, esto implica que *el estudio de las condiciones climáticas debe introducirse en todos los niveles de planeamiento, diseño y ejecución de nuestro entorno físico.*

Así al estudio aportan disciplinas como la meteorología, la fluidodinámica, la arquitectura, el planeamiento físico, etc., y a ello se agrega un factor que complica esa relación debido al carácter subjetivo de muchos conceptos de confort ambiental. El viento crea diversas molestias, entre otras por su efecto mecánico o térmico, las mismas no sólo tienen importancia para hallar criterios de confort aceptables, (vinculados a la velocidad y características del viento), también por el condicionamiento subjetivo que impone a las actividades humanas y que es de mucha significación.

2.2 El concepto de la capa límite atmosférica

En particular, los efectos del viento son uno de los factores que afectan de diversas maneras tanto a las edificaciones como al confort humano. Pero para poder cuantificar sus efectos es imprescindible saber modelar este factor de manera correcta para cada caso, función del escalón que se desee evaluar. De esta manera surge la necesidad, para establecer este modelo, de conocer las características del viento, y para ello el movimiento de un fluido en contacto con una superficie quieta genera un concepto básico de la mecánica de los fluidos conocidos como *la capa límite*. El desplazamiento de un fluido sin perturbaciones ni turbulencia alrededor de un cuerpo puede concebirse como el movimiento de un sinnúmero de láminas delgadas del fluido, como las capas de una cebolla, circulando cada una con su velocidad propia e interactuando entre sí: las capas más rápidas aceleran a las más lentas y estas frenan a aquellas, entre las capas actúan fuerzas de rozamiento producidas por las tensiones de corte presentes en el fluido. Puede comprobarse experimentalmente que la capa vecina al cuerpo, en general y en condiciones normales de presión

está detenida. No existe velocidad relativa entre ella y la superficie del cuerpo, no hay resbalamiento ni deslizamiento sobre esta última. Ello constituye una importante condición de contorno: *la condición de no deslizamiento*. La capa inmediatamente superior a la descrita se mueve, acelerada por las fuerzas de fricción (tensiones de corte) de capas superiores más rápidas y frenada de igual modo por la capa inmóvil sobre el cuerpo. Al alejarnos de la superficie del cuerpo, las capas fluidas adquieren mayor velocidad, hasta alcanzar, a cierta distancia de dicha superficie la velocidad de corriente libre. Cada elemento de superficie de un sólido frena (disminuye la cantidad de movimiento) del fluido que lo rodea. El conjunto de elementos genera una capa de fluido más lenta en su entorno: *la capa límite*, de espesor pequeño, en general, respecto de la magnitud del cuerpo sobre el que se desarrolla (ver Figura 1).

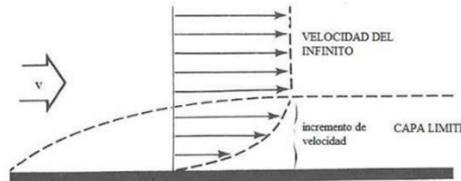


Figura 1. Esquema básico de una capa límite [1].

Cuando el flujo dentro de la capa límite ocurre bajo la forma ordenada de láminas o capas paralelas descrita se dice que se cumple en régimen laminar, de lo contrario se denomina de régimen turbulento. Las escalas de la capa límite dependerán del tamaño del objeto, podrán resultar desde milímetros, sobre la superficie de un cuerpo, hasta cientos de metros para el caso del movimiento del aire sobre la superficie terrestre, este es el caso de la denominada **capa límite atmosférica** [3].

La existencia de elementos que provoquen perturbaciones en la velocidad que, en ciertas circunstancias, se pueden amplificar induciendo el colapso de la estructura primitiva de capas, genera el fenómeno denominado transición laminar-turbulenta, lo cual ocurre en un punto de transición. (ver Figura 2)

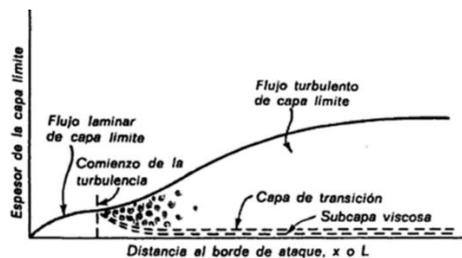


Figura 2. Esquema de una capa límite laminar con transición a turbulenta [1].

El resultado de este proceso es una nueva forma de movimiento del flujo dentro de la capa límite: una forma desordenada caracterizada por importantes fluctuaciones y efectos de mezcla: el régimen turbulento. La turbulencia es característica esencial de la capa límite atmosférica.

El fluido frenado en la capa límite puede perder tanto velocidad como para detenerse en ciertas regiones, originando corrientes de retroceso, zonas de recirculación y zonas de generación de vórtices. Estas corrientes de retroceso "alejan" la capa límite de la superficie del cuerpo. Se dice entonces que la capa límite se ha "*desprendido*" y el fenómeno se conoce como "*despegue*" de la capa límite (Figura 3). Dicho fenómeno produce una activa formación de remolinos, pérdida de energía cinética, considerables incrementos de resistencia de fricción superficial y fenómenos de mezcla.

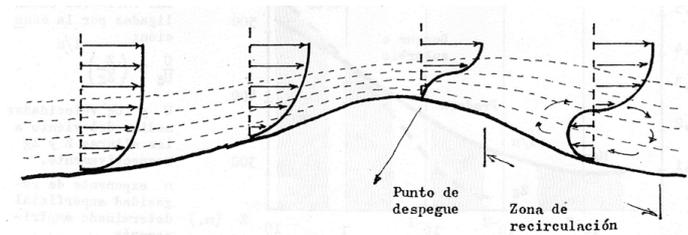


Figura 3. Esquema de los efectos de despegue de la capa límite [1].

Conformaciones fluidodinámicas de este tipo acontecen en las zonas posteriores (estelas) de cilindros, esferas, conos, paralelepípedos o prismas, es decir, formas geométricas usuales en la construcción. El arquitecto, ingeniero o planificador físico debe prestar atención a aquellas zonas en que se producen fenómenos de desprendimiento, reversión de flujo, generación de remolinos y estelas causantes de condiciones adversas para la calidad de vida del lugar, o que generen efectos secundarios sobre las estructuras de las edificaciones, no considerados en su diseño.

2.3 El perfil de velocidades

Se ha tratado de describir los fenómenos analizados (la capa límite) matemáticamente, desarrollándose diferentes modelos descriptivos de la variación de velocidades medias con la altura en función de distintos tipos de rugosidad del suelo. Además del viento es importante considerar la variación de temperaturas con la altura.

La radiación solar eleva la temperatura del suelo que por conductividad y difusión turbulenta calienta la capa de aire que lo rodea; a su vez, esta cede calor a la capa de aire que se encuentra por encima de ella y así sucesivamente. De esta forma se establece una variación de temperatura con la altura, es decir, una estratificación de temperaturas que provoca el correspondiente flujo de calor. Dicha variación de temperaturas constituye una característica fundamental en la atmósfera, determinando su estabilidad o inestabilidad, permitiendo o no que los humos asciendan y se difundan, definiendo las variaciones verticales de densidad, humedad, etcétera.

El fenómeno eólico interacciona con la distribución de temperaturas. En arquitectura e ingeniería eólica se distinguen dos casos importantes: 1) Vientos fuertes: provocan enérgicos procesos de mezcla que destruyen toda estratificación térmica preexistente, uniformando la temperatura en una amplia región; 2) Vientos débiles: su intensidad es insuficiente para destruir los gradientes de temperatura. En esas condiciones la variación vertical de temperatura subsiste influyendo intensamente en los procesos de mezcla turbulenta, generando a su vez movimientos de aire caliente ascendente, de aire frío descendente y movimientos horizontales de compensación que interaccionan con los vientos existentes. Para el caso "1", la capa límite suele aproximarse aceptablemente mediante una ley de potencias, es decir, considerando la velocidad media del viento a cierta altura como proporcional a esa altura elevada a determinada potencia (Ecuación 1 y Figura 4).

$$\frac{U}{U_g} = \left(\frac{Z}{Z_g}\right)^{1/n} \quad (1)$$

Siendo U y U_g las velocidades medias del viento a las alturas Z y Z_g respectivamente.

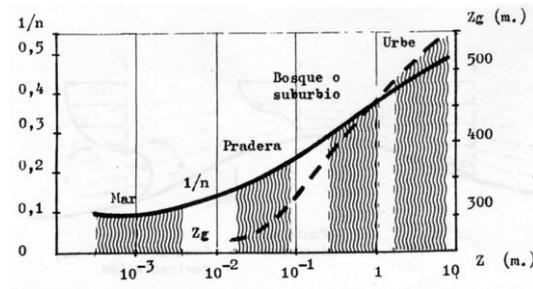


Figura 4. Variación del exponente $1/n$ y de la altura de referencia Z_g en función de la rugosidad superficial [1].

Analizando datos eólicos en diecinueve ubicaciones con diferentes condiciones y rugosidades superficiales, Davenport [4] estableció los respectivos perfiles de velocidades medias en la capa límite para tipología “1”. En la Figura 5 vemos los resultados obtenidos para cuatro casos típicos de interés en la construcción del ambiente.

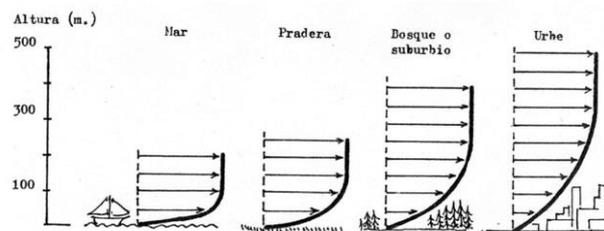


Figura 5. Velocidades medias de viento para diferentes tipos de ambiente para el caso “1” [4].

Para el caso “2” el problema resulta mucho más complejo, la distribución vertical de velocidades medias no obedece la “ley de la potencia” dado que el flujo es más complejo y de características que deberán analizarse y tratarse individualmente en cada oportunidad.

2.4 Características del viento. Turbulencia

El viento presenta como una de sus características fundamentales su continua fluctuación, causada por las variaciones impredecibles, aleatorias y caóticas de los valores instantáneos de dirección, velocidad, presión, temperatura, densidad, etcétera. Dicha característica del viento se denomina turbulencia y puede ser analizada a través de métodos estadísticos. En efecto, si bien no podemos prever los valores instantáneos de los parámetros fluidodinámicos turbulentos, podemos registrar sus promedios (valores de medias, medias máximas, medias mínimas, máximas y mínimas que ocurren pocas veces por hora, etcétera, y sobre la base de esos resultados estadísticos hacer predicciones sobre dichos valores medios.

De acuerdo con lo anterior es posible expresar, por ejemplo, la velocidad del viento (V) en un punto fijo P y en un instante cualquiera t , como compuesta por la velocidad media registrada (U) más un valor fluctuante en cada instante (u), según la expresión: $V = U + u$. Ello permite concebir al viento como compuesto por una corriente de velocidad media U que, a su vez, arrastra una serie de remolinos de diferente tamaño e intensidad. Cuando la dirección de la corriente generada por el remolino es contraria a la de la velocidad media se tendrá en el punto P una velocidad instantánea V , inferior a la media, en tanto que, si hay coincidencia en la dirección, V será superior a la media (Figura 6, parte superior).

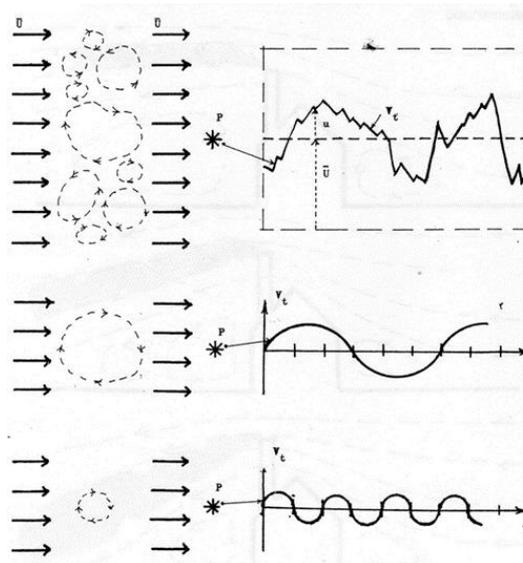


Figura 6. Ejemplos de velocidades fluctuantes del viento (aleatorias y no-aleatorias) [1].

Las fluctuaciones registradas en el punto P duran el tiempo que uno de estos remolinos necesita para pasar por P, lo que permite derivar el concepto de escala de la turbulencia que implica que remolinos de gran escala espacial (gran tamaño) producen fluctuaciones de gran escala temporal (gran longitud de onda o de baja frecuencia), en tanto que los de reducida escala espacial (pequeños) producen fluctuaciones de pequeña escala temporal (reducida longitud de onda o de alta frecuencia, Figura 6, partes central e inferior). Lo anterior no debe inducir a creer que los remolinos se apartan de una total aleatoriedad, irregularidad de formas y tamaños permanentemente cambiantes al azar.

En resumen, una corriente turbulenta presenta remolinos de muy diferente tamaño, que persisten durante distintos lapsos: desde remolinos grandes a muy pequeños que duran tiempos relativos entre muy breves a prolongados.

A pesar de ello, es posible hallar para la corriente ciertos rasgos distintivos en su comportamiento estadístico, pues grandes, medianos y pequeños, habrá casos en que los remolinos medianos superan a los grandes y pequeños u otros en que los más numerosos son los más pequeños. Lo anterior puede expresarse también en función del factor tiempo: tipo de generación de remolinos, vida media de los mismos y destrucción de ellos, a través de formar más remolinos más pequeños o en razón de haberse consumido su energía cinética, todo esto por unidad de tiempo.

Todos estos factores son de importancia para definir las características de determinada atmósfera. Si en una corriente eólica abundan, por ejemplo, los remolinos grandes, la forma general en que el fluido se mueve, esto es, su conformación fluidodinámica será la indicada en la Figura 7.

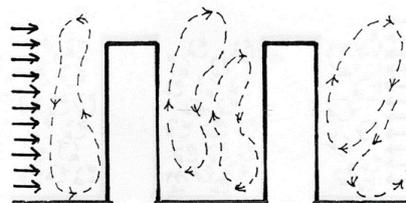


Figura 7. Conformación fluidodinámica con predominio de vórtices de escala espacial grande [1].

Un campo turbulento de esas características transporta fluido desde la superficie del suelo hasta los estratos sobre los edificios e inversamente, por lo que es un muy buen "mezclador" (mezclando el aire junto al suelo con aquel por encima de los edificios) con lo cual quita y diluye contaminantes del nivel de la calle, lo cual, en general, será conveniente. Pero si nos hallamos en un clima frío, inyecta aire gélido proveniente de cierta altura en el nivel peatonal, extrayendo el más tibio de ese nivel, lo que podría resultar, en tal caso, desventajoso desde el punto de vista del confort y de los gastos necesarios para la calefacción. Si, en cambio, predominan totalmente los remolinos pequeños, en una configuración como la ilustrada en la Figura 8, los fenómenos de mezcla y sus consecuencias serán enormemente más reducidos que en el ejemplo anterior.

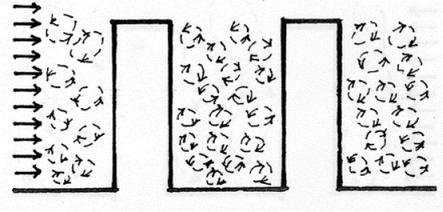


Figura 8. Conformación fluidodinámica con predominio de vórtices de escala espacial pequeña [1].

Puesto que es posible demostrar que la pérdida de energía cinética, es decir la disminución de velocidad por fenómenos de frotamiento aerodinámico (si se excluyen fenómenos del tipo Bernoulli) es tanto mayor cuanto más pequeño es el tamaño medio de los remolinos, podrá inferirse un modo de "calmar" los vientos demasiado intensos.

Por ejemplo, podrá filtrarse la corriente eólica a través de las barreras permeables como arboledas, lo que "cortará" al viento de un campo de remolinos grandes en uno de remolinos pequeños, que disiparán rápidamente su energía cinética por los mecanismos de frotamiento viscoso contra el mismo fluido que lo rodea.

Cuando se habla de ráfagas se está mencionando un fenómeno vinculado a las fluctuaciones de corta duración de los parámetros que definen al viento, ya sea que este aumente o disminuya en un corto lapso su intensidad o que cambie su dirección o sentido durante unos instantes. Por tal razón, como la consideración de la velocidad media puede ser el producto de infinitas distribuciones diferentes de velocidades instantáneas, para definir las características de la corriente eólica, no será suficiente conocer la velocidad media del viento, ya que ello no nos precisará la intensidad y duración de las ráfagas que ocurran por encima y por debajo de esa velocidad media (Figura 9).

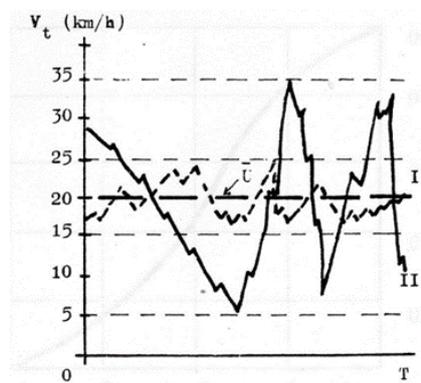


Figura 9. Señales de la fluctuación de la velocidad para los casos I y II [1].

Observando, por ejemplo, los dos casos ilustrados en la Figura 9 (la curva I es el resultado de ráfagas que no exceden 5 km/h por arriba o abajo de la media y la curva II, los 15 km/h por encima o por debajo de esa media) en los que, obviamente, el espectro de turbulencia será totalmente distinto, aunque la velocidad media sea idéntica. Ello se traducirá en que los efectos de diverso tipo variarán profundamente, intensificándose los fenómenos observados con la intensificación de las ráfagas. Los efectos estructurales variarán totalmente incidiendo en el trabajo a la fatiga y las vibraciones de distinto tipo en los elementos estructurales. Los efectos térmicos enfriarán o calentarán más rápidamente según el caso y aumentarán o disminuirán del mismo modo los fenómenos de mezcla. También se alterará la resistencia aerodinámica que provocan, en las fuerzas que aparecen, produciendo picos capaces de arrancar elementos de cubierta o cerramiento, en el polvo y arena que son capaces de transportar, en el confort humano que se puede experimentar, etc.

Por otra parte, debe tenerse en cuenta que el tipo de turbulencia y los tamaños de vórtices generados guardan cierta relación con el tamaño de los obstáculos que los generan. Así, un campo cubierto de hierba produce en el viento vórtices de pequeño tamaño, ya que los obstáculos son las briznas de pasto aisladas o en grupos. Un conjunto de árboles generará vórtices más grandes y un grupo de edificios en altura vórtices mucho más grandes, del mismo modo que los accidentes geográficos [5-6]. Lo antedicho también podrá expresarse en función de la duración de las ráfagas: vórtices grandes transportados por la corriente producen en un punto ráfagas de mayor duración que vórtices pequeños arrastrados por la misma corriente.

2.5 Simulación experimental (túnel de viento)

En un túnel de viento de capa límite [7] pueden estudiarse, a través de un ensayo sobre un modelo a escala reducida, diversos problemas vinculados con la fluidodinámica ambiental que hemos analizado con anterioridad. En efecto, las condiciones eólicas entre construcciones e instalaciones urbanas y la acción del viento sobre edificios determinados como, por ejemplo, velocidades de viento a la altura de los peatones en áreas de vivienda; solicitaciones eólicas sobre edificios; pérdidas de calor en un edificio debido a la acción del viento y muchos otros fenómenos pueden ser estudiados y cuantificados mediante el uso de esta herramienta de tipo experimental, que nos permite la simulación física de los fenómenos involucrados (Figura 10).



Figura 10. Imagen del Túnel de Viento “Dr. Jorge Colman Lerner” de la Facultad de Ingeniería - UNLP.

Al estudiar las condiciones y efectos del viento a través de ensayos sobre modelos es esencial lograr que las características del flujo atmosférico natural sean representadas en el túnel con semejanza rigurosa. Las características particulares del flujo en la capa límite atmosférica hacen que resulte muy complejo reproducir experimentalmente las

condiciones meteorológicas allí vigentes. Sin embargo, se obtienen buenos resultados mediante la experimentación en túneles de viento. Ello se debe a que los experimentos en túnel son repetibles, contrariamente a lo que sucede en la naturaleza, y también a que las mediciones pueden ser efectuadas en forma controlada y exacta que en las experiencias de campo. A pesar de todo, estas experiencias de campo en modelos reales resultan fundamentales, por cuanto proveen información de la solución real, que debe ser semejante a la creada en el túnel, permitiendo convalidar los resultados experimentales en el mismo. Los resultados de las experiencias de campo en modelos reales son, pues, las referencias más confiables para calificar y desarrollar nuevas técnicas de simulación.

La distribución de velocidades en la capa límite atmosférica es "generada" en el túnel de viento de manera bien diferente a la del proceso natural, mediante el empleo de grillas, rugosidades, obstáculos, etcétera (Figura 11). Esta forma de "generación" de capas límite hace posible el logro de distribuciones de velocidad de todo tipo, aun las que no se presentan en la atmósfera [8]. Los resultados de una simulación experimental se evalúan considerando la conformación fluidodinámica resultante en la sección de prueba (incluyendo las características turbulentas) y comparando esa solución con lo que ocurre en la realidad.



Figura 11. Imágenes de rugosidades en el Túnel de Viento.

Si se obtiene una adecuada reproducción del fenómeno natural, del cual debe conocerse lo más posible, se podrá utilizar el túnel para registrar otros datos de difícil medición in situ e intentar la extrapolación de las leyes naturales observadas, ensayando y desarrollando nuevas teorías.

Las condiciones que debe reunir un túnel de viento de capa límite son más complejas que las correspondientes a un túnel aerodinámico convencional, debido a la necesidad de generar capas límites con muy particulares distribuciones de velocidad y turbulencia. De esta manera, en instalaciones de cierta complejidad, pueden modelarse experimentalmente magnitudes como temperaturas, densidades, contenidos de vapor de agua, etcétera, así como también fenómenos de transporte de nieve, polvos, contaminantes gaseosos y otros.

3. Ejemplos de aplicación

3.1 Caracterización experimental del flujo de aire en el interior de un modelo de edificio.

Los objetivos de este ensayo fueron determinar cualitativamente el comportamiento del flujo de aire en el interior de los modelos de dos torres gemelas. Para ello se reprodujo, en túnel de viento de capa límite, una distribución vertical de vientos de la baja capa límite en una atmósfera urbana, por medio de elementos de rugosidad, generadores de

turbulencia en la entrada a la sección de pruebas del túnel. Se analizó el comportamiento del flujo en el interior del modelo de las torres, por medio de catavientos de hilo situados en cada altura, y con mediciones locales de velocidad media en determinados puntos del espacio central, mediante anemómetro especiales para esta tarea (Figura 12). El estudio se realizó para las direcciones de viento establecidas como predominantes en la región del emplazamiento (Singapur).

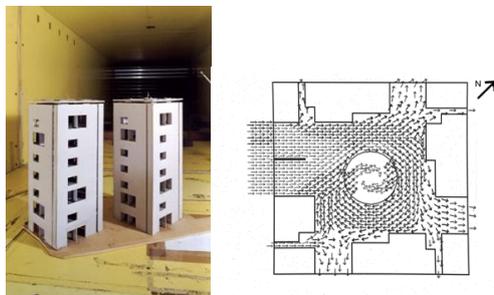


Figura 12. Imagen de las torres y resultados de velocidades en una planta.

3.2 Estudio eólico de complejo edilicio en la ciudad de Neuquén.

Se realizó la evaluación en túnel de viento de un complejo edilicio a construirse en la ciudad de Neuquén. El modelo a escala 1:200 fue instrumentado con 99 tomas de presión. Se reprodujo en el túnel de viento la baja capa límite atmosférica turbulenta, con un perfil de velocidades medias representativo de la zona urbana en la que se construiría el edificio. Se visualizó el flujo por medio de inyección de humo, para las direcciones de viento predominantes, con el objeto de determinar las configuraciones fluidodinámicas en el entorno del complejo, e identificar y caracterizar regiones con características eólicas particulares. Se determinaron las distribuciones de presión en cada fachada para esas direcciones de viento y se caracterizó el ambiente eólico a nivel peatonal (Figura 13).

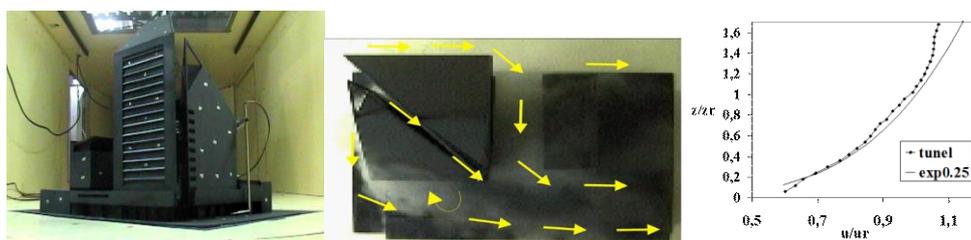


Figura 13. Imágenes, resultados y distribución de la capa límite del ensayo.

3.3 Ensayo en túnel de viento de modelo de barrera antichorro.

El objetivo del trabajo fue la determinación experimental de la eficiencia en reducción de velocidad media de una barrera antichorro. Se caracterizó el flujo detrás de barreras antichorro a diferentes distancias con el fin de determinar su comportamiento y el impacto sobre viviendas en las cercanías del aeropuerto de Carrasco, Uruguay. Se realizó un modelo a escala 1: 15 de la barrera, y se midió el campo de velocidades corriente debajo de la barrera con el fin de determinar sus características para proteger por el viento y la temperatura a la región aledaña, por el chorro impulsado por los motores de los aviones en la pista del aeropuerto (Figura 14).



Figura 14. Imágenes en túnel de viento y foto del emplazamiento real.

4.4 Estudio eólico de la réplica de la piedra movediza de Tandil.

Se ensayó en el túnel de viento un modelo a escala 1:40 de la Piedra Movediza y parte de la cumbre del Cerro La Movediza, construidos de acuerdo con la geometría especificada. El modelo de la Piedra fue adaptado para medir fuerzas en la dirección del viento y laterales. Fue instrumentado con 56 tomas de presión para obtener la distribución de presiones sobre el mismo. De las mediciones realizadas se determinó las cargas por el viento sobre la piedra, para el correcto diseño de los anclajes sobre el cerro (Figura 15).

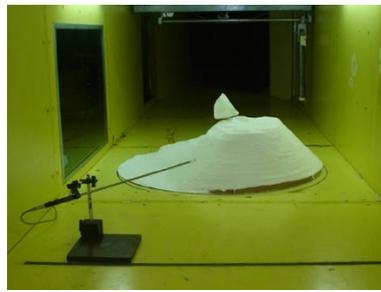


Figura 15. Imagen del modelo en el túnel de viento.

4.5. Determinación de las cargas aerodinámicas sobre conjuntos de silos de granos.

El propósito del estudio fue medir, experimentalmente en túnel de viento de capa límite, la fuerza de resistencia aerodinámica sobre cada uno de los diez silos, para tres direcciones del viento sobre ellos: longitudinal al eje principal, a 45 grados y a 90 grados respecto de dicho eje y las respectivas distribuciones de presiones, con el fin principal de estimar las cargas producidas por el viento sobre cada elemento y el conjunto (Figura 16).



Figura 16. Imagen en túnel de viento del ensayo.

4.6. Estudio eólico de un estadio

El objetivo del ensayo fue la determinación experimental en túnel de viento de las cargas aerodinámicas sobre el proyecto de una cubierta para un estadio. Para la realización del estudio se construyó un modelo a escala de 1:150 del estadio, y se determinó la distribución de las presiones, para cuantificar las cargas del viento sobre la cubierta, y de esta manera considerar dichos efectos sobre los anclajes de esta (Figura 17).

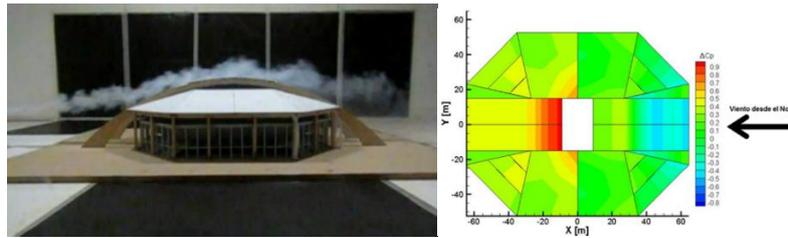


Figura 17. Imagen de las mediciones, resultados y la visualización del flujo sobre la cubierta.

4.7. Estudio eólico de una cubierta compleja.

El objetivo del estudio fue la determinación experimental en túnel de viento de las cargas aerodinámicas sobre el modelo a escala de una cubierta compleja de un estacionamiento con membrana tensada. Para la realización del ensayo se realizó una maqueta del modelo a ensayar en escala 1:75. Se determinó la distribución de las presiones sobre la cubierta con el fin de evaluar el tensado de la membrana debido a las cargas del viento (Figura 18).

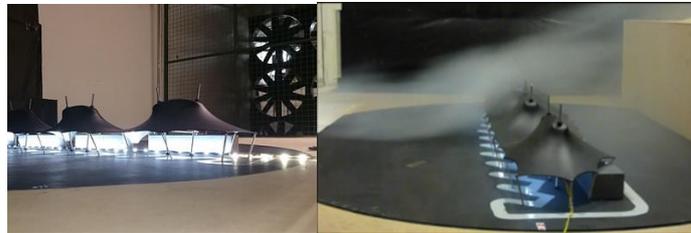


Figura 18. Imágenes de la maqueta en el túnel de viento.

4. Conclusiones

El objetivo del trabajo fue poner en situación los conceptos, poco conocidos, de esta disciplina de la Ingeniería del Viento, mostrando ejemplos de estudios realizados en nuestro laboratorio para poner en contexto su aplicación e importancia a la hora del proyecto y diseño de elementos que pueden ser influenciados por los efectos del viento, en general.

4. Referencias

- [1] MOROSI, J.A., BOLDES, U, COLMAN, J.L. (1984). *Fluidodinámica del ambiente; una introducción a los aspectos fluidodinámicos de la arquitectura y el urbanismo*. La Plata, P.N.E.N.C., p. 165.
- [2] VYSOUDIL, M. (2015). Urban space and climate: Introduction to the Special Issue, *Moravian Geographical Reports*, 23(3), p. 2-7.
- [3] KAIMAL, J.C., FINNIGAN, J.J. (1994) *Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement*. Nueva York, Estados Unidos: Oxford University Press. p. 289.
- [4] DAVENPORT, A.G. (1972). An approach to human comfort criteria for environmental wind conditions, *Colloquium on Building Climatology*, Stockholm, Sweden.
- [5] PENWARDEN, A.D., WISE, A.F.E., (1975). *Wind environment around buildings*. London : H.M.S.O. p. 52.

- [6] GANDEMER, J., GUYOT, Y.A. (1976). *Integration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti*. Ministère de l'équipement, Direction de l'aménagement foncier et de l'urbanisme : diffusion, La documentation française. P. 130.
- [7] CATTAFESTA, L. , BAHR, C., MATHEW, J. (2010). *Encyclopedia of Aerospace Engineering*. Chapter: Fundamentals of Wind-Tunnel Design. (Eds R. Blockley y W. Shyy). p. 1-10. doi:10.1002/9780470686652.eae532,
- [8] KOZMAR, H. (2011). Characteristics of natural wind simulations in the TUM boundary layer wind tunnel. *Theoretical and Applied Climatology*, 106(1–2), p. 95–104. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0417-9>