

Umbrales aerodinámicos como estrategia de diseño para mitigación de efectos del viento en el espacio público

Aerodynamic thresholds as a design strategy to mitigate the effects of wind in public space

¹Rafael Moya Castro

RESUMEN

El viento es un factor que puede abrir nuevos ámbitos de exploración funcional y estética-morfológica para el diseño arquitectónico. Y con los cuales, se pueden desarrollar nuevas estrategias de diseño para mejorar el confort ambiental. El presente artículo analiza la valoración y aprovechamiento de tres estudios independientes sobre estrategias de mitigación y control de espacios de confort, recogiendo y combinando algunas reglas de diseño que estos proponen, y que se basan en características aerodinámicas. Estos son los estudios de *slot* aerodinámicos, pantallas porosas y fuselajes. Así, su utilización combinada y estratégica en tres elementos técnicos-arquitectónicos, es propuesta como regla para diseñar una cubierta protectora para zonas del espacio público con alto nivel de incomodidad producto del viento y que no disponen de otras medidas mitigatorias. El uso de estos principios aerodinámicos permite idear una estructura semi abierta, haciéndola menos aparatosa, menos invasiva y más ligera en el espacio peatonal. Se acuña el término de umbrales de viento, para identificar el efecto de una ráfaga de viento deflectante y protectora a modo de bóveda o burbuja, que es generado por la combinación de estos elementos. La efectividad de esta estrategia para el control del viento se prueba con modelos de dinámica de fluidos computacionales. Los resultados indican que se produce una mitigación y deflexión del viento que conforma una amplia zona de protección.

Palabras clave

Aerodinámica urbana; simulación CFD; diseño mobiliario urbano; confort ambiental

ABSTRACT

Wind is a factor that can open new exploration areas for functional and morphological purposes, in the architectural design discipline. In these areas is possible to develop new design strategies to improve the levels of environmental comfort. This article presents the assessment and use of three independent studies on mitigation and control strategies for wind comfort, collecting and combining some design rules that they propose, which are based on their aerodynamic features. These are the studies of the aerodynamic "slot" porous screens and fuselages. Thus, a combined and strategic use in three technical-architectural elements is proposed as a rule to design a protection canopy for areas of public space with a high level of discomfort caused by the wind and with lack of other mitigating measures. The use of these aerodynamic principles allows to design a semi-open structure, making it less cumbersome, less invasive and lighter in for pedestrian areas. The term "wind thresholds" is coined to identify the effect of a deflecting and protective gust of wind in the form of a dome or bubble, which is generated by the combination of these elements. The effectiveness of this strategy for wind control is tested with computational fluid dynamics models, seeking to verify that there is an effective mitigation and deflection of the wind that increases the protection zone.

Keywords

Urban Aerodynamics; CFD simulation; urban furniture design; environmental comfort

INTRODUCCIÓN

El viento es un medio dinámico. Un fluido en el cual el ser humano y sus obras se encuentran inmersos. Durante años se ha planteado la pregunta de cómo visualizar, entender y diseñar con esta materia (Aynsley, 1999; Casanueva, 2003; Burry, 2013). Ámbitos como la náutica y la aeronáutica llevan años adaptando y diseñando para navegar y volar en las formas más eficientes posibles. En ese contexto, la ingeniería estudia los fenómenos de viento en edificios de altura y estructuras de gran escala, a través de complejas y costosas simulaciones. Pero, para ámbitos como la arquitectura, el viento resulta un medio casi inmaterial y desconocido; difícil de incorporar y traducir en estrategias o principios de diseño.

Es así como, en muchos casos, la disposición de los edificios en las ciudades produce cambios inesperados en el patrón del movimiento del viento, generando ráfagas con vientos acelerados al nivel de suelo en calles, zonas peatonales y espacios públicos. Este tipo de fenómenos no previstos, resultan cada vez más recurrentes por el progresivo aumento en la construcción de edificios de gran altura, que arrastran vientos fuertes al nivel de calle, afectando el confort y seguridad de peatones (Tsichritzis y Nikolopoulou, 2019). Un ejemplo es el caso del distrito financiero de la ciudad de Toronto en Canadá, donde el constante desarrollo urbano de ese sector, que incluyó edificios de gran altura, ha generado condiciones de fuertes vientos en espacios peatonales (Adamek *et al.*, 2017).

De este modo, la estrategia más recomendada para mitigar los efectos del viento en el espacio de las calles es el uso de árboles como cubierta protectora vegetal (Kang *et al.*, 2020). Pero, aunque los árboles traen asociados muchos otros beneficios, estos requieren un tiempo prolongado de crecimiento para alcanzar ese nivel de protección. Además, no protegen de las corrientes horizontales de viento y no pueden ser plantados en todos los espacios urbanos ni crecer adecuadamente. Para esos casos, cubiertas artificiales especialmente diseñadas y localizadas, serían una buena medida como apoyo al uso de cubiertas vegetales. Sin embargo, no existen guías o reglas de diseño, fuera de las que consideran los esfuerzos estructurales, para crear cubiertas eficientes en su función protectora.

En consecuencia, el presente artículo busca responder a la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué reglas o principios de diseño, que incorporen características aerodinámicas, pueden ser utilizadas como guías para diseñar cubiertas arquitectónicas más eficientes, para protección y confort, en el espacio público?

El artículo analiza la utilización estratégica de tres elementos técnicos-arquitectónicos, basados en conceptos aerodinámicos, para diseñar cubiertas protectoras más eficientes, estos son: a) las bóvedas de viento, b) los fuselajes y c) las barreras quebravientos. A partir de la exploración de estos conceptos, se propone un diseño de mobiliario urbano, para controlar el efecto del viento en lugares de la ciudad que no disponen de otras medidas mitigatorias. Se propone, a modo de hipótesis, que el uso de estos principios aerodinámicos permite idear una estructura semiabierta, haciéndola menos aparatosa, menos invasiva y más ligera en el espacio peatonal. La efectividad de esta estrategia para el control del viento se prueba con simulaciones computacionales, buscando verificar si se produce una mitigación y deflexión del viento que genera una extensa zona de protección.

Las simulaciones mostraron que una extensa zona de calma era posible de ser generada por estos elementos integrados en un diseño de barreras y cubiertas quebravientos, que deflecan verticalmente el viento. Esto, instalado en la zona de una parada de tranvía, en una avenida afectada por fuertes vientos, de la ciudad de Melbourne.

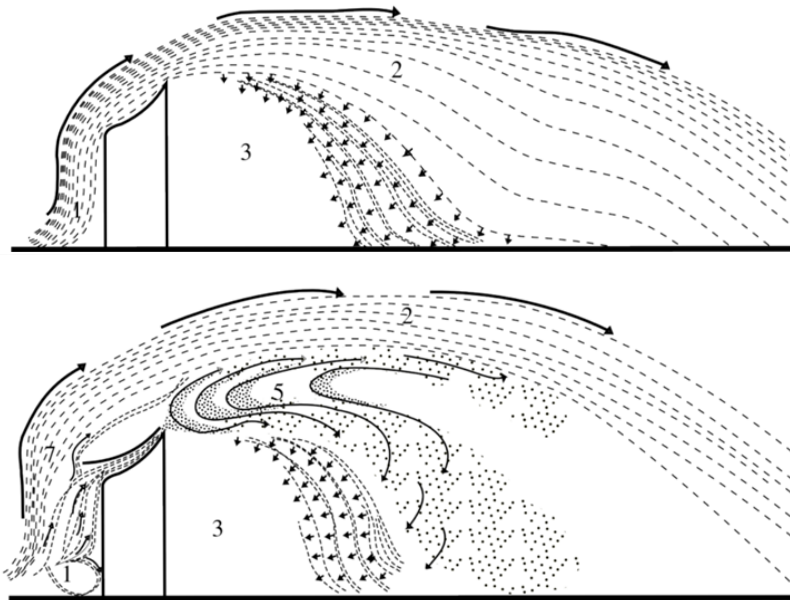
MARCO TEÓRICO

El primer elemento técnico-arquitectónico está basado en una idea desarrollada para la propuesta presentada por un equipo liderado por el arquitecto Francisco Méndez, de la Escuela de Valparaíso, en el proyecto para el concurso de la Escuela Naval en Valparaíso de 1956 (Ureta, 2007). En dicho trabajo se incorporó a los edificios una cubierta curva con un sistema de *slot* aerodinámico que permitió deflecar el viento verticalmente, generando una zona de protección más amplia y extendida, en reemplazo de un edificio más alto. La corriente de aire que era proyectada hacia atrás del edificio es llamada *bóveda de viento* y producía una amplia zona de protección en los patios exteriores de la escuela (Figura 1).

Un segundo elemento técnico-arquitectónico son los quebravientos. Estos son una de las estrategias más estudiadas para producir zonas de protección, usando membranas porosas y estructuras permeables, como quebravientos artificiales. Se han realizado estudios que han probado su uso efectivo para proveer condiciones de protección y confort ante el viento. Destacan las investigaciones sobre sus características aerodinámicas realizadas por Jacques Gandemer (Gandemer, 1979), quien estableció grupos de reglas de diseño para quebravientos, de forma que aumenten y mejoren las áreas de protección que generan (Gandemer, 1981). Estas reglas consideran grados de porosidad de las pantallas, alerones cortaviento, ranuras de ventilación, la burbuja aerodinámica y la asociación de pantallas porosas (Figura 2). Queda, así, el desafío de cómo adaptar y optimizar estas reglas de diseño para ser utilizadas en diseños arquitectónicos en espacios urbanos.

Figura 1

Dibujo comparativo del efecto del viento sobre un edificio sin slot aerodinámico (arriba) y con slot aerodinámico (abajo), para el proyecto del concurso Escuela Naval en Valparaíso (1956).



Fuente: Reproducción del autor basado en la documentación del proyecto.

El tercer elemento técnico arquitectónico son los fuselajes propuestos por Manuel Casanueva a lo largo del desarrollo de la obra la Hospedería del errante (Casanueva, 2003). Específicamente se refiere a los “elementos arquitectónicos fuselados”, que permiten deflectar y

Figura 2

Tipos de quebravientos y sus características aerodinámicas estudiados por Gandemer.

Types of windbreaks used				scale h=5m, L=120m							
Model num	sketch	porosity	comments	Model num	sketch	porosity	comments	Model num	sketch	porosity	comments
BV 2		0%	reference: the wall	BV 9		70%		BV 16A			canopy
BV 3		47%	homogen distribution	BV 10		45%	same porosity as BV 3	BV 16B			canopy
BV 4		20%	homogen distribution	BV 11			ventilation the wake by upstream dynamic	BV 17A			spring-board
BV 5		sup 40% inf 100%	ventilation of the wake at the base	BV 13			superelevation by the upstream dynamic	BV 17B			
BV 6		sup 0% inf 100%	ventilation of the wake at the base	BV 14			combination BV13-BV6, BV11	BV 18			complement to BV 11

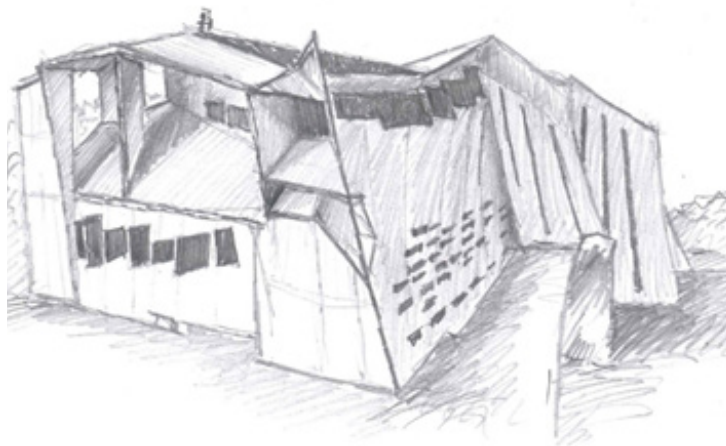
Fuente: Reproducción propia basada en la tabla publicada en Gandemer (1981).

dirigir el movimiento del viento cuando este interactúa con los muros de una fachada. Estos fuselajes son imaginados en la Hospedería del errante como una tensión de formas entre dos tipos de superficies (edros y oides), que encajan y conectan para formar las llamadas membranas deflectoras. El resultado de estas membranas-fuselajes es la conjunción entre fachada y cubierta en un solo manto, cuya función es captar, acelerar y proyectar el flujo del viento a lo largo de su superficie y más allá de la zona de sotavento (patio trasero). Así, se logra una zona *eddy* extensa, que pasa a ser un espacio de protección y de confort del programa arquitectónico (Figura 3).

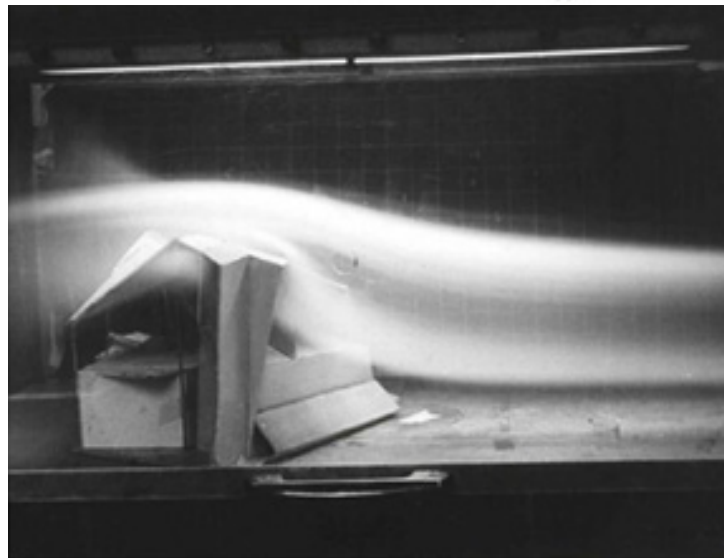
Figura 3

Croquis de la Hospedería del errante (A). Prueba de túnel de viento sobre la fachada tipo "tobera" (B).

A



B



Fuente: Elaboración propia.

El análisis de estos tres elementos, utilizados conjuntamente, es lo que se realiza en este estudio. A partir de ello se propone un diseño que se enfoca en generar flujos de aire deflectados que producen zonas de ráfagas que funcionan como pantallas al modo de las bóvedas de viento del proyecto del concurso de la Escuela Naval en Valparaíso (1956). Estas ráfagas son denominadas umbrales de viento y su función es conformar las zonas de protección o burbujas de confort.

Cabe mencionar que otras investigaciones y prácticas que han desarrollado una morfología del diseño bajo una perspectiva aerodinámica para diseñar estructuras de control microclimático, pueden encontrarse a modo de conceptos y prototipos, como el concepto de una marquesina pasiva para una parada de bus, estudiado por el SUTD-MIT International Design Centre (Kaijima, 2013). Por otro lado, Michael Hensel y Achim Menges han explorado junto a estudiantes, morfologías de refugios en prototipos y conceptos, en donde algunos alumnos desarrollaron conceptos de membranas porosas que fueron sometidas a simulaciones computacionales de interacción con el viento (Hensel y Menges, 2006). Siguiendo esas mismas exploraciones, Hensel y un grupo de estudiantes realizaron la instalación/prototipo *Las piedras en el cielo* (2012), ubicada en la localidad de Ritoque, Chile (Hensel, 2013), donde se definieron estratégicamente una serie de diferentes membranas tensadas, siguiendo la respuesta que estas presentaban a simulaciones computacionales de viento.

METODOLOGÍA

La metodología de esta investigación se separa tres etapas. La primera, comprende una zona microclimática de una ciudad donde, debido a la configuración urbana y el clima estacional, se presentan efectos de viento que afectan significativamente el nivel de confort en el espacio público. La segunda, corresponde al proceso de diseño de una estructura protectora (utilizando una combinación de fuselajes, *slots* y quebravientos) que genere espacios de protección y alcance niveles aceptables de confort para un paradero de tranvía (que está ubicado justo en un sector de fuertes ráfagas de viento). La tercera, está compuesta de dos simulaciones, realizadas mediante software CFD, para observar si la combinación de elementos diseñados produce los espacios de protección y de confort propuestos. Así, este experimento vinculó los parámetros de los fenómenos aerodinámicos en el contexto urbano, los problemas del viento local y el rendimiento de estas estructuras aerodinámicas. De este modo, se verificó la correcta generación de regiones *eddy*, así como áreas de protección en el orden y localización proyectadas.

Viento en áreas urbanas: el efecto cañón

Para facilitar los experimentos y análisis aerodinámicos, se seleccionó un fenómeno de viento urbano específico que se presenta comúnmente en este contexto, causado por el viento con prevalencia estacional en la ciudad de Melbourne (dirección norte a sur). La alta velocidad del

viento a lo largo de una calle estrecha, conocida como efecto canal o *channeling* (Gandemer, 1978), puede causar incomodidad a los peatones en este sector.

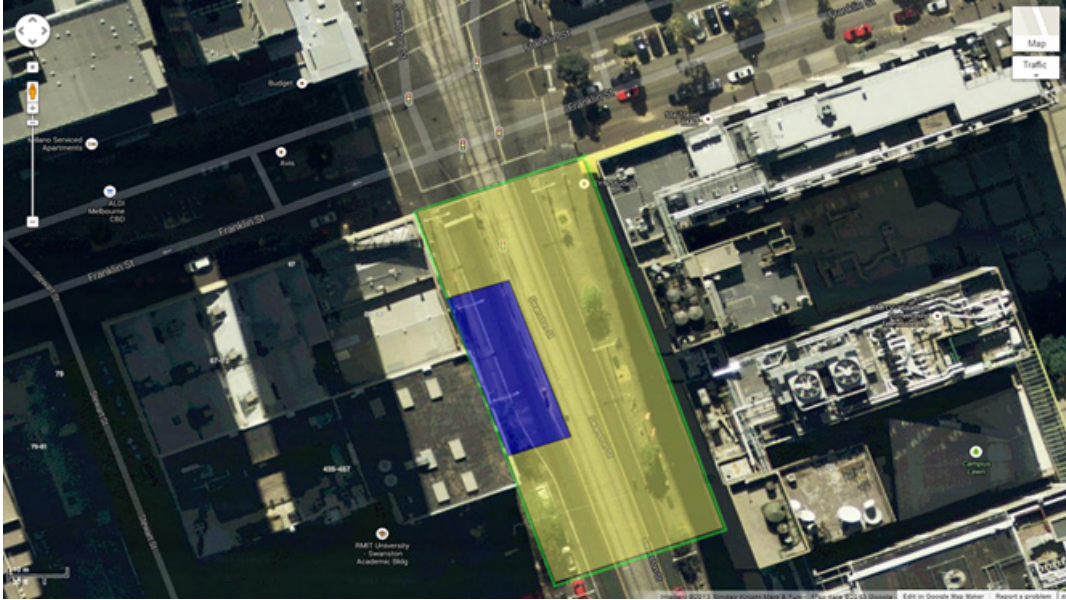
La ciudad de Melbourne es un ideal escenario para este estudio, debido a sus frecuentes casos de fuertes vientos en sectores de la ciudad. Entre estos, la esquina de Swanston Street y Franklin Street es un sector particularmente interesante, pues se produce un cambio en el *skyline* y entramado urbano. Aquí aparecen edificios de mayor altura, además que la trama se vuelve más regular, lo que marca el cambio entre la zona del *downtown* y las áreas del norte con un perfil más de suburbio. Se han observado en este sector complejos cuadros de intensos vientos, los que han devenido incluso en situaciones de alto riesgo como la caída de árboles y el colapso de un muro de albañilería a escasos metros de esta esquina, donde fallecieron tres personas (The Age, 2013).

En específico, el sector de estudio constituye un interesante ejemplo, pues esta esquina –al comienzo de Swanston Street–, es donde los vientos del norte (zonas de suburbios) chocan con los muros de los edificios más altos y se encauzan por esta calle hacia el centro de la ciudad, lo cual produce el efecto cañón ya mencionado. Aquí, en la esquina de Stawston, está ubicada una parada del sistema de tranvías, donde las personas deben permanecer esperando el transporte público, lo que las expone a un constante impacto de los vientos, pues no existe ninguna estructura de cobijo, salvo una pequeña cubierta de cristal para la lluvia. Registros realizados durante una hora en el lugar, midieron ráfagas de viento de velocidades de hasta 10 m/s (Moya, 2015). Esto presenta una estupenda oportunidad para realizar el presente estudio, puesto que se combinan las negativas condiciones microclimáticas de viento y su impacto en el confort de las personas en el espacio público.

El espacio descrito anteriormente involucra dos áreas: el espacio de la calle y un sitio de parada de tranvía. La calle corre de Sur a Norte y tiene 30 m de ancho e incluye una vía de tranvía del sistema de transporte público. Esta parada de tranvía es un área de 4,5 m de ancho y 69 m de largo en la acera oeste. Considera escaso mobiliario urbano y solo un techo para proteger a los peatones mientras esperan el transporte público.

Las estadísticas muestran, para esta región, una tendencia de los vientos predominantes de norte a sur durante la segunda mitad del año (Bureau of M, 2013). En un día ventoso, con viento del norte, el efecto de canal se produce a lo largo de la calle, con más intensidad alrededor de una zona de parada de tranvía cerca de la intersección de la calle. Aquí no hay protección del follaje natural de los árboles y el viento fluye a nivel del suelo con gran velocidad a lo largo de la acera y la parada del tranvía (probablemente intensificado por las esquinas de las fachadas), lo cual provoca alta incomodidad en los peatones que esperan el transporte público (Figura 4).

Figura 4
Vista aérea de la zona de parada de tranvía (azul).

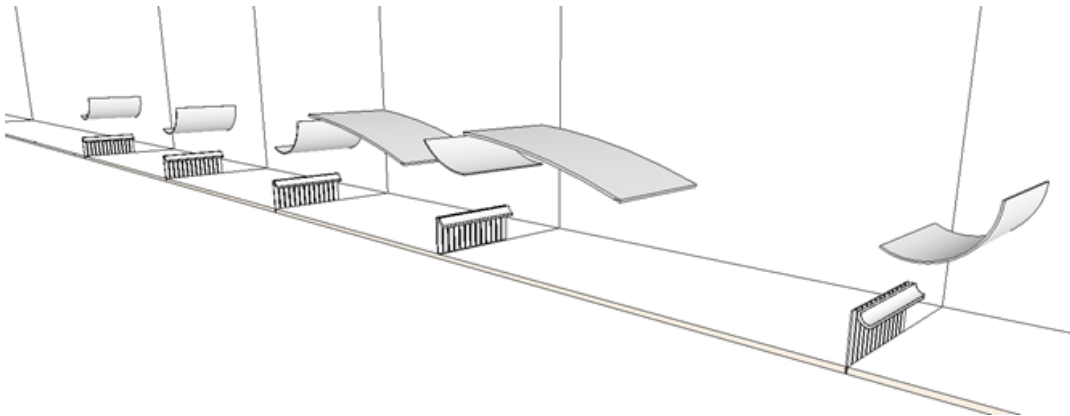


Fuente: Elaborado a partir de GoogleMap.

Diseño de una cubierta para un paradero de tranvía

El proceso de diseño implica la definición de un grupo de regiones de protección en base a la observación de las condiciones de uso de los peatones, y un grupo de simulaciones Computational Fluid Dynamic (CFD) para definir la instalación de cada dispositivo mitigador. Además, el primer diseño de la parada del tranvía se basa en una interpretación literal de las formas de los quiebravientos y las características aerodinámicas estudiadas por Gandemer. Esos principios son adaptados como instalaciones físicas para producir estas regiones de protección en un espacio urbano.

Figura 5
Modelo 3D simplificado del diseño de cubiertas y quiebravientos para un paradero de tranvía.



Fuente: Elaboración propia.

Las definiciones de regiones de protección consideran 3 programas básicos en el lugar. El primero, es un refugio con techo para los peatones que esperan el tranvía. El segundo, es un área frente a la entrada de un edificio privado. Finalmente, está la entrada principal al mismo edificio con más tráfico de personas. Estos tres espacios superponen las actividades y funciones de un edificio privado con un espacio público. Por tanto, el plano general de la parada del tranvía tiene 4 regiones (Figura 5).

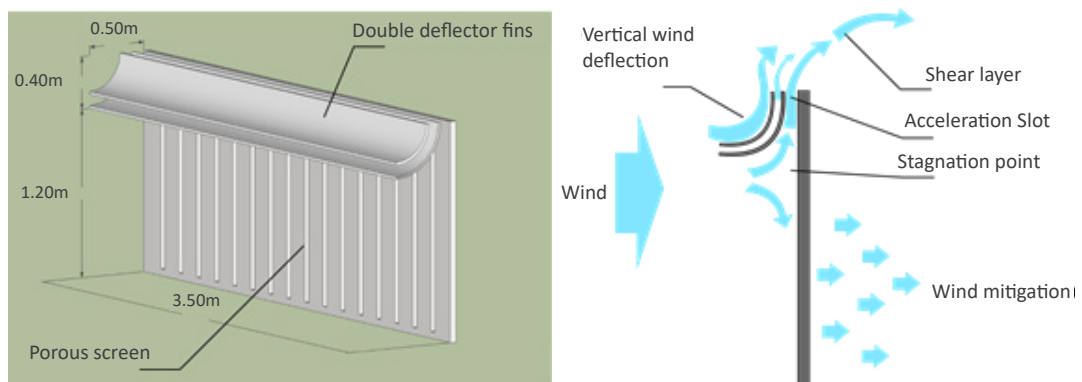
La propuesta a probar se compone de los siguientes elementos tecnoarquitectónicos:

- a) barrera quebraviento
- b) *slot* aerodinámico
- c) cubierta fuselaje

Cabe mencionar que, en una primera etapa, para simplificar y facilitar la simulación computacional, todos los modelos estudiados y probados son geometrías simples que representan pantallas, individuales o cubiertas, donde su condición de barreras porosas es más significativa y fácil de modelar. La exploración morfológica de estos elementos será tema de futuras investigaciones.

La barrera quebraviento corresponde a una pantalla porosa de 1.5 m de altura. Se basa en los principios de quebravientos estudiados por Gandemer. Su objetivo es mitigar el flujo de viento a nivel de suelo en que, por un lado, pasa a través de la porosidad de la barrera, a la vez que es deflectado verticalmente. Esto genera una burbuja de confort detrás de la barrera. Puestas varias de estas barreras, en intervalos de distancia, se crea una cadena de burbujas de confort a lo largo del área de la parada de tranvía (Figura 6).

Figura 6
Modelo 3D de la barrera quebraviento con su "slot" aerodinámico de doble perfil.

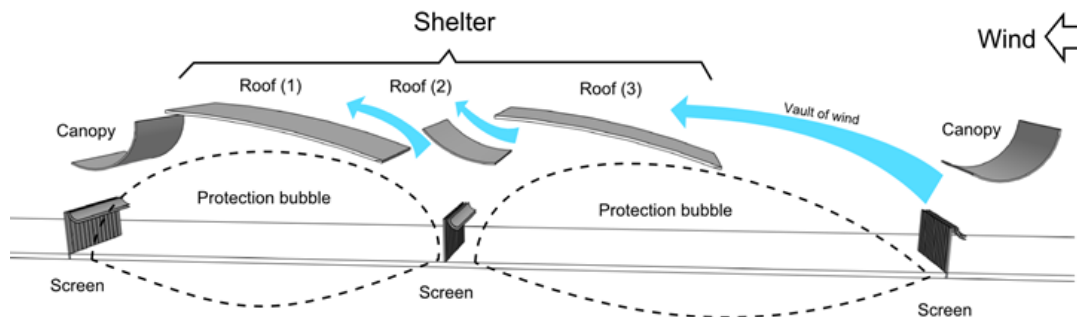


Fuente: Elaboración propia.

El *slot* aerodinámico es una superficie deflectora que deja una separación con la barrera que permite acelerar el flujo del viento. Se localiza en la parte superior de las barreras quebraviento. Se compone de un perfil deflector horizontal a cierta distancia de la superficie de la barrera. Esta separación es el *slot* o ranura por el cual pasa el flujo de viento acelerándose. Este flujo incrementa la deflexión vertical del viento al chocar con la barrera y se comporta como una extensión vertical de la barrera misma, aumentando la altura de la burbuja de confort. Está basado en el principio de las bóvedas de viento mencionados en el proyecto de la escuela naval (Figura 6).

La cubierta fuselaje es una membrana suspendida a 3 metros de la barrera quebraviento, a la que se suma una segunda cubierta más grande, que evita el retorno del flujo del viento hacia el suelo y provee protección para la lluvia. Su función es generar una región o estela de aire turbulento de baja presión. Esta estela de baja presión ayuda a mantener las burbujas de confort altas y constantes, ya que mitiga el retorno del flujo del aire hacia el suelo, una vez pasada las barreras quebraviento. Esta cubierta es el cuerpo más aéreo de todo el conjunto y, en ese sentido, se inspira en la idea de fuselajes de la Hospedería del Errante –de Casanueva– para lidiar con el flujo del viento deflectándolo y conduciéndolo para mantener la estela de baja presión. Se compone de dos cubiertas cóncavas y una convexa. Se dejan dos separaciones entre cubiertas que permiten la salida de flujos de aire, para que este no retorne hacia los peatones que esperan el transporte público (Figura 7).

Figura 7
Diagrama del conjunto fuselaje y barrera quebravientos.



Nota: El fuselaje genera un área de baja presión que permite una deflexión del viento, desde el "slot" más alta. Opción con fuselaje opaco (izquierda), y fuselaje poroso (derecha). **Fuente:** Elaboración propia.

Simulación con software CFD

Para probar la efectividad de la estrategia del uso de los tres elementos técnico-arquitectónicos, se realizaron cuatro simulaciones (CFD). La primera correspondió a una simulación utilizando solo una primera parte del conjunto de elementos que constituían el proyecto. Se trató del primer tercio del paradero, del sector de barlovento, y que comprendía dos barreras quebraviento, y una cubierta larga cóncava con un *slot* en

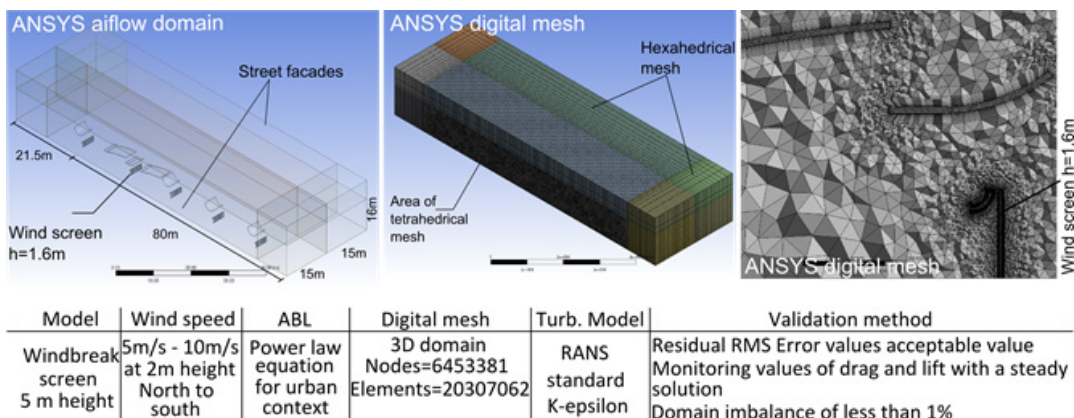
el medio (representando una geometría tradicional para la cubierta). La segunda simulación comprendía tres barreras quebraviento y una cubierta que combina formas cóncavas y otra convexa, además de dos *slots* y que es expresión de la estrategia de fuselaje propuesta por Manuel Casanueva (Figura 7). La tercera simulación comprendía el conjunto completo de elementos técnico-arquitectónicos a lo largo de todo el espacio de la parada del tranvía (Figura 5), pero en una cuarta simulación se eliminaron las aletas deflectoras y *slots* que estaban montados en cada barrera (Figura 6).

Debido a la limitación de instrumentos, datos y tiempo, no fue posible replicar las condiciones reales del viento del lugar para el propósito de estos experimentos. Para simplificar las simulaciones, se utilizan condiciones estándar como parámetros. Así, para la simulación digital, el contexto urbano se representa como una geometría simple y regular de un canal. El estándar de incomodidad del viento utilizado es una velocidad de 5 m/s a 1,5 m de altura (nivel de la cabeza) (Wisse, 1988). El viento fluye solo en una dirección (característica principal de un efecto de canal). Se omite la aceleración en las curvas, pero se consideran otras condiciones de viento como la capa límite atmosférica basada en la ecuación de la ley de potencias (Aynsley *et al.*, 1977). La intensidad de la turbulencia del viento se fija en un nivel bajo (5%).

Se modela una malla digital como la región donde se recrea el fenómeno. Tiene 30 m de ancho (similar a la distancia entre fachadas), 16 m de alto y 69 m de largo. La cara inferior representa el suelo, las caras laterales son fachadas de calles. A estas superficies se les da un bajo grado de rugosidad para simular la fricción.

La segunda malla digital es el dominio de la parada de tranvía con 10 m de altura, 15 m de ancho y 46 m de largo. Esta pequeña región tiene más densidad en la malla para una simulación más detallada del viento (Figura 8).

Figura 8
Malla de la región de la calle para simulación.



Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

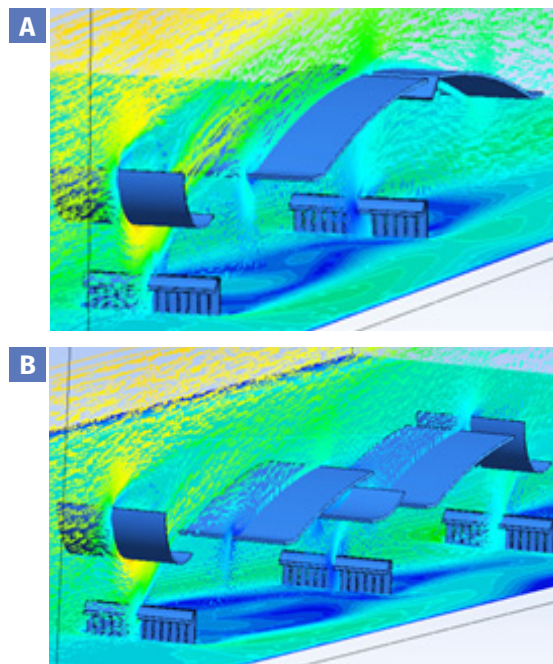
El objetivo de estos elementos arquitectónicos es generar umbrales de viento. Estos umbrales pueden entenderse como desviaciones verticales del viento para reemplazar una barrera física. Para lograrlo, estos elementos deben crear una capa de baja presión sobre la zona de parada del tranvía. Así, con una pantalla con un 20% de porosidad, una superficie curva horizontal a modo de deflector con sistema de doble ranura y un fuselaje convexo encima de la barrera, se proporciona una zona de protección para cada zona de la parada del tranvía. El requisito principal es mantener la barrera porosa vertical baja (1,6 m de altura). Además, la protección debe ser generada por el efecto de umbral del viento, sin necesitar de una barrera más alta.

Simulación modelo cubierta cóncava

La primera simulación mostró, en la primera barrera quebraviento, una fuerte deflexión vertical (umbral de viento) y una región de protección de 3,5 m de altura. Esto significa una doble altura de la propia barrera. Esta deflexión vertical se define como una capa de cizalla libre que separa el flujo de corriente libre de la región de recirculación, aumentando el área de protección. El efecto se puede controlar manipulando la posición de los elementos deflectores (deflector cóncavo y horizontal). Con este umbral de viento, es posible reducir la altura de la barrera porosa vertical para no interrumpir la vista de los peatones. Adicionalmente, a partir de esta primera simulación es posible definir las distancias para la posición de las otras pantallas y deflectores (Figura 9A).

Figura 9

Simulación cubierta. Perfil cóncavo (A). Perfil convexo y "slot" de captación (B).



Fuente: Elaboración propia.

En la misma simulación se estudió los efectos producidos en un perfil de techo cóncavo para la parada del tranvía. Este techo se instaló con una curvatura para atrapar el umbral proyectado hacia el lado de sotavento y desviarlo hacia arriba sobre la superficie superior del techo. Con un espacio de ventilación en la parte superior de la curvatura, es posible reducir la aceleración del viento en este refugio. Se trató de una geometría típica de techo, con la sola función de proteger de la lluvia y del viento que retorna desde la primera barrera. Sin embargo, se detectó una aceleración del viento en el área de salida de la región del techo. Para evitar esto, se instaló una segunda barrera porosa debajo de este techo.

Simulación modelo cubierta fuselaje

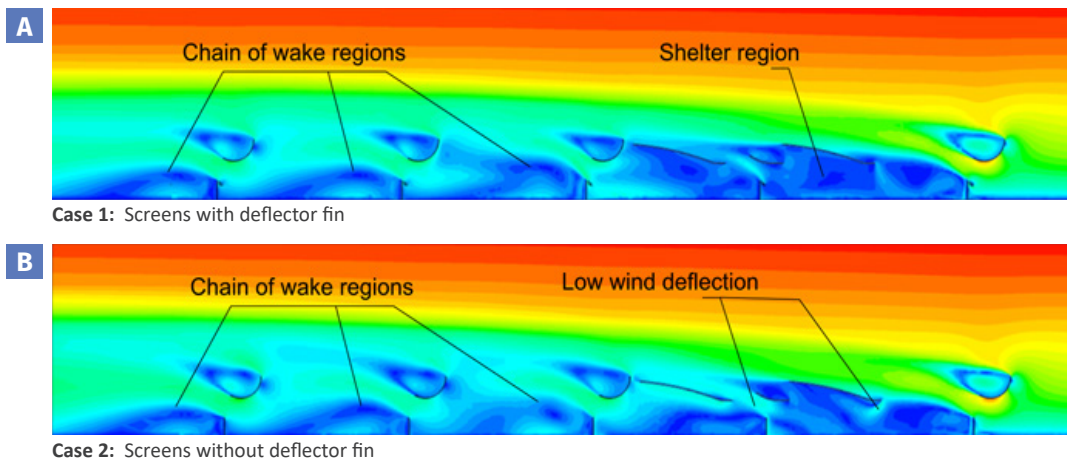
En una segunda simulación se estudió un nuevo diseño de cubierta, con un principio más de fuselaje, lo que significa que integraba formas cóncavas y convexas, además de varios slots. En principio, se observó que la zona de protección de la primera barrera quebraviento lograba una mayor área de extensión y esta alcanzaba más homogéneamente a la segunda barrera quebraviento. Sin embargo, se registró un estrechamiento de la zona de protección tras la segunda barrera, sin quedar clara la causa de esto. Por otro lado, también se notó que la deflexión vertical del viento en cada barrera lograba mayor amplitud, evacuando el flujo de viento por los slots de la cubierta (Figura 9B).

Simulaciones modelo completo (con y sin aletas deflectoras)

La tercera simulación mostró toda la región de protección generada en el espacio de la parada del tranvía. Con las 5 pantallas porosas y sus respectivos fuselajes deflectores instalados, se produjo el fenómeno de continuidad de umbrales de viento en cadena, que era uno de los efectos deseados. Así, se constató que estos umbrales eran más altos y extensos que las barreras quebraviento (Figura 10A).

Figura 10

Simulación CFD con quebraviento y dispositivo slot (A). Sin dispositivo slot (B).



Fuente: Elaboración propia.

Para verificar el impacto de los dispositivos de aleta y *slot* sobre cada barrera, se realizó una cuarta simulación sin aletas ni *slot* sobre las barreras quebraviento. En esta última simulación se observó que el área de protección bajo la cubierta fuselaje perdió homogeneidad y altura, produciéndose varias ráfagas de viento que pasaban por debajo de las cubiertas y a la altura de las caras de los usuarios (Figura 10B).

DISCUSIÓN

Los fenómenos aerodinámicos alrededor de los edificios y los problemas del viento en las áreas peatonales brindan una oportunidad para experimentar con el diseño de nuevos sistemas de mitigación a través de exploraciones arquitectónicas que van más allá de cubiertas y simples refugios para mitigar el viento, las cuales son soluciones efectivas, pero de limitada aplicabilidad a otros casos. Tal fue el estudio de las Silvertop Towers en la ciudad de Antwerp (Flanders, Bélgica), que es un ejemplo de análisis de las condiciones microclimáticas de espacios entre edificios (pasajes) con problemas de viento intenso generados por la configuración de los edificios (efecto Venturi), pero que proponía como medida de mitigación el cierre del espacio con puertas correderas automáticas (Blocken *et al.*, 2004). Similar es el caso de un patio a los pies de otra torre en el distrito financiero de Zincirlikuyu en Estambul estudiado por Serteser y Karadag (2018), donde el fuerte viento desviado por la misma torre afectaba el nivel de confort de las personas en ese espacio. Aquí la propuesta fue cerrar y techar el patio en cuestión de forma que el flujo de viento pasara por encima y fuera desviado a más distancia del edificio. Estas soluciones de diseño pueden ser efectivas para estos casos, pero de una manera particular (espacios pequeños, semi-públicos), pero no son soluciones practicables para espacios públicos más abiertos como veredas y zonas peatonales de calles.

Este artículo presenta un enfoque adicional para mejorar el control de protección en áreas públicas abiertas: la asociación de tres elementos técnicos arquitectónicos que, asociados y dispuestos estratégicamente, permitieron la generación de umbrales de viento y áreas de protección efectivas, sin necesidad de estructuras más complejas, costosas y que resultan incómodas para el flujo de peatones. Este enfoque puede servir para generar principios o reglas de diseño dirigidas a áreas de confort en el espacio público. Además, podrían ser explorados en nuevos diseños, conjugando siempre los principios de quebravientos, fuselajes y los *slot* aerodinámicos. La asociación de estos tres elementos ha permitido la generación y control de lo que se denomina umbrales de viento, que permiten conformar regiones de confort en ambientes ventosos, en zonas urbanas.

Los resultados preliminares de estos experimentos y simulaciones para un diseño hipotético de una parada de tranvía sugieren que las características aerodinámicas dan un nivel control de las regiones de protección en una parada de tranvía. Así, se puede controlar su altura por medio de fuselajes deflectores superiores y su extensión por medio

de la secuencia de varios quebravientos. El efecto generado de umbrales de viento se puede utilizar como un método pasivo eficaz para mitigar la velocidad del viento, sin necesidad de aumentar el tamaño de los quebravientos, evitando también interrumpir el flujo peatonal y prevenir la excesiva carga o esfuerzo estructural que el viento genera sobre estructuras más grandes.

Las principales diferencias entre los estudios y prototipos realizados por Kaijima y Hensel, con respecto a la propuesta presentada en este trabajo, es que:

- 1) en esos casos anteriores, las estrategias de diseño estaban basadas básicamente en un sólo principio que rige toda la estrategia: la superficie ondulante (fuselaje) de la marquesina pasiva o las membranas tensadas espaciales (porosidad) de Hensel;
- 2) las propuestas anteriores se enfocaban siempre como estructuras pequeñas e individuales. En la presente investigación se utilizó no uno sino una combinación de tres principios en la estrategia de diseño (fuselaje, quebraviento poroso, umbral del viento) y una organización de elementos distribuidos, pero trabajando asociadamente en el lugar. Este tipo de estrategia compuesta no ha sido explorada por investigaciones anteriores, lo que abre un campo para aprovechar el conocimiento acumulado sobre estos principios aerodinámicos, que se desarrolló en forma separada.

CONCLUSIÓN

La presente investigación se planteó abrir un ámbito de exploración de diseño, basado en la asociación estratégica de tres elementos aerodinámicos, los cuales son combinados y adaptados a un contexto y escala que no había sido planteado antes. Para estudiar la efectividad de esta idea se escogió un sector del entramado urbano, donde la configuración de la ciudad generaba una condición microclimática negativa de viento en el espacio público, y se diseñó una estructura de mitigación (a modo de mobiliario urbano) que seguía los principios de las tres estrategias. Finalmente, se realizaron simulaciones computacionales, donde se observó que se lograba generar una configuración efectiva de umbrales de confort, como se había planeado. Esto permite imaginar posibles nuevas aplicaciones de esta combinación de estrategias en otras situaciones donde el viento resulte ser un factor de molestia en el espacio público urbano y donde los sistemas tradicionales de barreras vegetales (árboles) no son fácilmente implementables.

Paralelamente, este estudio aporta un enfoque que, en el ámbito de la formación de arquitectos, es de un positivo interés, puesto que contribuye con nuevas ideas para la exploración de diseños que permiten elaborar estrategias de control microclimático –más variados y efectivos– en el espacio público. Así, se trata al viento como una materia de exploración arquitectónica más compleja y sofisticada para su estudio,

otorgando herramientas para entender e interactuar creativamente con “las energías de la intemperie”, como decía Manuel Casanueva, sin caer en una utilización efectista o alegórica. Es decir, se trata de comprender el diseño de espacios desde la perspectiva aerodinámica de causas y efectos, haciendo posible trabajar con el viento como el arquitecto trabaja con la luz.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adamek, K., Vasan, N., Elshaer, A., English, E., y Bitsuamlak, G. (2017). Pedestrian-level wind assessment through city development: A study of the financial district in Toronto. *Sustainable Cities & Society*, 35, 178–190. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.06.004>
- Aynsley, R. M., Melbourne, W. H., y Vickery, B. J. (1977). *Architectural aerodynamics*. Applied Science Publishers.
- Aynsley, R. M. (1999). Shape and flow: The essence of architectural aerodynamics. *Architectural Science Review*, 42(2), 69–74. <https://doi.org/10.1080/00038628.1999.9696854>
- Blocken, B., Roels, S., y Carmeliet, J. (2004). Modification of pedestrian wind comfort in the Silvertop Tower passages by an automatic control system. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92(10), 849–873. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2004.04.004>
- Bureau of M, A. G. (2013). *Climate statistics for Australian locations*. http://www.bom.gov.au/climate/averages/tables/cw_086071_All.shtml
- Burry, J. (2013). *Designing the Dynamics. High-performance sailing and real-time feedback in design*. Melbourne Books.
- Casanueva, M. (2003). *De los campos de abstracción y los elementos para una arquitectura experimental*. Universidad Finis Terrae.
- Gandemer, J. (1981). The aerodynamic characteristics of windbreaks, resulting in empirical design rules. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 7(1), 15–36. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(81\)90065-9](https://doi.org/10.1016/0167-6105(81)90065-9)
- Gandemer, J. (1978). *Building Research Translation. Discomfort due to wind near buildings: aerodynamic concepts*. Department of Commerce, National Bureau.
- Gandemer, J. (1979). Wind Shelters. *Journal of Industrial Aerodynamics*, 4, 371–389. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(79\)90013-8](https://doi.org/10.1016/0167-6105(79)90013-8)
- Hensel, M. (2013). *Performance-Oriented Architecture: Rethinking Architectural Design and the Built Environment*. John & Wiley Sons.

- Hensel, M., y Menges, A. (2006). *Morpho-ecologies*. Architectural Association.
- Kaijima, S., Bouffanais, R., Willcox, K., y Naidu, S. (2013). Computational fluid dynamics for architectural design. *Architectural Design*, 83(2), 118–123. <https://doi.org/10.1002/ad.1566>
- Kang, G., Kim, J., Choi, W. (2020). Computational fluid dynamics simulation of tree effects on pedestrian wind comfort in an urban area. *Sustainable Cities and Society*, 56. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102086>
- Moya, R. (2015). *Wind analysis in the early design stage: an empirical study of wind visualisation techniques for architects*. Tesis doctoral. University of Melbourne.
- Serteser, N., y Karadag, I. (2018). Design for improving pedestrian wind comfort: a case study on a courtyard around a tall building. *Architectural Science Review*, 61(6), 492–499. <https://doi.org/10.1080/00038628.2018.1492899>
- Millar, R. y Gough, D. (03 de abril de 2013). The wall, and why it collapsed. *The Age*. <https://www.theage.com.au/national/victoria/the-wall-and-why-it-collapsed-20130402-2h56t.html>
- Tsichritzis, L., y Nikolopoulou M. (2019). The effect of building height and façade area ratio on pedestrian wind comfort of London. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 191, 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.05.021>
- Ureta, A. (2007). *El proyecto de la escuela naval del instituto de arquitectura de Valparaíso: investigación y arquitectura 1956-57*. Tesis de magíster. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Wise, J. A. (1988). A Philosophy for Teaching Wind in the Built Environment. *Energy and Buildings*, 11, 157–161.