ARQUITETURA REVISTA

v.17 n.2 2021
DOI: 10.4013/arq.2021.172.02

TORRES DE VIENTO: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE VENTILACIÓN NATURAL APORTADO EN VIVIENDAS

WIND TOWERS: POTENTIAL EVALUATION OF NATURAL VENTILATION IN HOUSING

Nelson Arias-Jiménez [1]
Maureen Trebilcock-Kelly [2]
Ariel Bobadilla Moreno [3]
Rodrigo Figueroa San-Martín [4]

Resumen

El calentamiento global, sumado al fenómeno de isla de calor, ha originado alzas en las temperaturas y con ello riesgo de sobrecalentamiento en las viviendas emplazadas en entornos urbanos, cada vez más sobrepoblados. Si bien las crecientes demandas de refrigeración pueden ser cubiertas mediante la ventilación natural, muchas veces ésta no puede ser aplicada por no contar con aberturas óptimas en las fachadas, o bien, por no tener la exposición necesaria a los vientos predominantes. Frente a esto, las torres de viento o "*windcatchers*" se presentan como potencial solución debido a su capacidad de captar viento por sobre los límites de la techumbre encausándolos al interior de la vivienda. Este trabajo evaluó mediante simulaciones el potencial de ventilación natural en viviendas pertenecientes a conjuntos residenciales, así como el aporte de la torre de viento a estas. Tras los resultados, se pudo evidenciar la ausencia de criterios de diseño en los conjuntos, que consideren al viento respecto a la orientación y exposición de las aberturas que presentan las viviendas. Confirmando para los casos desfavorables, el aporte de la torre de viento que, gracias a su naturaleza multidireccional, puede operar independiente de la orientación que tenga la vivienda respecto a los vientos.

Palabras clave:, *Windcatcher,* ventilación natural, viviendas de condominios, simulación.

Abstract

Global warming, in addition to the urban heat island effect, has raised temperatures and with it the risk of overheating in houses located within increasingly overcrowded urban environments. Although the increasing demands for cooling may be satisfied by natural ventilation, often this cannot be applied due to the lack of optimal openings in the facades, or well, for not having the necessary exposure to the prevailing winds. Against this, wind towers or "windcatchers" are presented as a potential solution because of their ability to capture wind over the roof limits, channelling them into the house. This work evaluated through simulations the potential of natural ventilation in homes belonging to residential complexes, as well as the contribution of the wind tower to these. The results evidence the absence of design criteria for the housing complexes, which consider wind in the orientation and exposure of the openings which houses. For unfavourable cases, the contribution of the wind tower is confirmed, which thanks to its multidirectional nature can operate independently of the orientation of the house with respect to the winds.

Keywords: Windcatcher, natural ventilatión, gated communities, simulation.

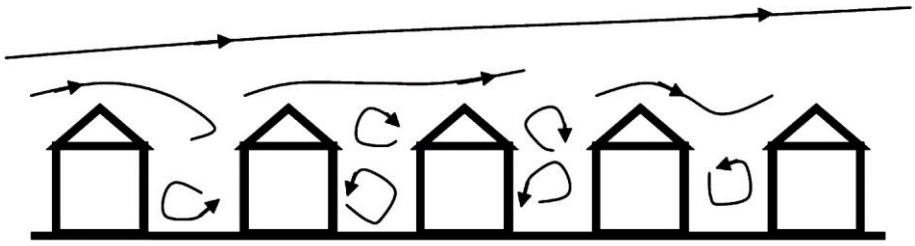
[1] Universidad del Bío-Bío, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Departamento de Diseño y Teoría de la Arquitectura, orcid.org/0000-0003-1782-7314, narias@ubiobio.cl
[2] Universidad del Bío-Bío, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Departamento de Diseño y Teoría de la Arquitectura, orcid.org/0000-0002-1984-0259, mtrebilc@ubiobio.cl
[3] Universidad del Bío-Bío, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Departamento de Ciencias de la Construcción, orcid.org/0000-0003-2781-5325, abobadil@ubiobio.cl
[4] Universidad del Bío-Bío, Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción UBB, orcid.org/0000-0002-4382-3782, rfiguero@ubiobio.cl

INTRODUCCIÓN

El calentamiento global en combinación con el fenómeno de isla de calor ha aumentado la temperatura ambiente de las cada vez más extensas ciudades, originando una amplia demanda de refrigeración para garantizar el bienestar de la población. Dicha demanda es vista con preocupación, ya que de no mejorar las condiciones de confort, estas pudiesen ser resueltas con equipos de aire acondicionado, aumentando el consumo energético considerablemente (1). Por esta razón, los investigadores han centrado su atención en la ventilación natural, la cual además de tener la capacidad de asegurar la calidad del aire en recintos interiores, posee el potencial de brindar confort térmico a sus ocupantes (2). Esto se torna vital, dado que el fenómeno del calentamiento global no solo implica el aumento gradual en la temperatura de la superficie del planeta, sino que también advierte cambios en los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos (3), traduciéndose en olas de calor más frecuentes que impactan el desempeño de los edificios para brindar confort térmico.

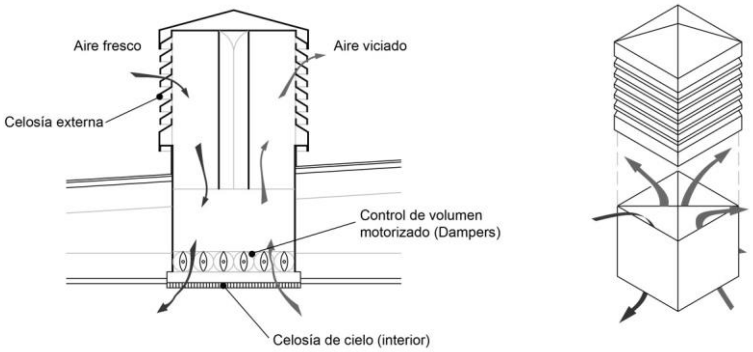
Conforme a lo expuesto, una estrategia pasiva dirigida al control del sobrecalentamiento en edificaciones, como la que ofrece la ventilación natural, cobra relevancia por su bajo impacto energético y ambiental. Sin embargo, no siempre se puede explotar al máximo su potencial, ya que factores como la configuración urbana y la de las propias edificaciones, juegan un rol preponderante a la hora de un buen desempeño. Esto se debe a que los vientos disponibles son influenciados por los efectos térmicos de las ciudades y las rugosidades urbanas dadas por la forma estructural de los vecindarios, la red de calles y las condiciones de sus edificaciones (4). Por consiguiente, la planificación urbana debiese también basarse en el rendimiento de la ventilación considerando las diferentes morfologías edificatorias y configuraciones barriales, generando esquemas razonables de densificación (5). En esta línea, un estudio enfocado en la ventilación natural como estrategia de mitigación al sobrecalentamiento de edificios en ciudades costeras latinoamericanas, plantea que es posible garantizar la comodidad de las personas, al contemplar el aumento de la velocidad del aire obtenido con un buen diseño urbano. Sin embargo, esto no siempre se considera en la planificación de las ciudades actuales (6). Por el contrario, factores como la rápida urbanización de las ciudades, el aumento del valor del suelo y la escasez de espacio, han desembocado en un paisaje urbano cada vez más compacto y con menos espacios abiertos, dificultando las posibilidades de la ventilación urbana (7). Esto último se evidencia en el caso de las viviendas densamente emplazadas, las que producto de su proximidad conforman una superficie rugosa sobre la que el viento avanza con poco desplazamiento vertical, generando que el flujo alrededor de las fachadas se torne altamente turbulento y disminuya el potencial de ventilación cruzada a través de las aberturas en las fachadas (8) (figura 1).

*Figura 1: Patrón de flujo sobre viviendas densamente emplazadas (*8, p. 380)



En atención a las dificultades antes indicadas de la ventilación natural, es que actualmente cobran sentido los sistemas de ventilación vertical como el que ofrecen las torres de viento o *windcatcher*. Dichos sistemas se caracterizan por el uso de dispositivos verticales, los cuales dada su altura permiten captar las presiones de vientos locales existentes sobre los límites de las edificaciones, encausándolos al interior de la vivienda para evacuarlos finalmente a través de la misma torre; todo gracias al empuje de las presiones de viento y al efecto de flotabilidad del aire interior (figura 2). Esto funciona sin importar si la orientación de las aberturas enfrenta o no a los vientos predominantes, puesto que la torre opera independiente de los cambios en la dirección del viento, captando y canalizando el aire fresco hacia el interior por los mismos cuadrantes que eventualmente podría generarse la evacuación de aire. Por otro lado, la torre de viento puede proporcionar ventilación natural con las ventanas cerradas, proporcionando ventilación segura frente al riesgo de intrusión en ausencia de moradores, así como también operar en horas de la noche.

Figura 2: Esquemas de funcionamiento de torre de viento moderna o Windcatcher.



El origen de la torre de viento se remonta a un sistema milenario de acondicionamiento ambiental empleado por la arquitectura tradicional de Medio Oriente para generar ventilación y refrigeración natural en regiones cálidas y áridas (9, 10, 11). Entre los casos representativos figuran las torres de viento de Yazd en Irán, donde la trama de la ciudad se densifica para reducir la exposición de luz solar directa y maximizar la cobertura de sombra en los callejones y espacios urbanos. Por esta razón, las torres de Yazd son normalmente estructuras altas que sobrepasan los techos de los edificios, ya que producto de la densidad urbana no cuentan con vientos significativos a la altura de las fachadas (figura 3).

*Figura 3: Torres de viento multidireccionales en la ciudad de Yazd, Irán (*9, p. 204)

Respecto a la torre de viento moderna, si bien opera basada en los mismos principios que las tradicionales, han debido reinterpretar su diseño a nuevas condiciones climáticas y de uso. Partiendo por el cambio de material; pasando del adobe, ladrillo y madera de las torres tradicionales, a la fibra de vidrio, gel *coat*, aluminio y planchas galvanizadas, que forman parte de los materiales actuales. Otro factor de innovación es la posibilidad de control del sistema por el usuario, ya que es factible manejar la velocidad y dirección con que ingresa el flujo de aire, a través de un mecanismo de amortiguadores o "*dampers*", ubicados inmediatamente arriba del difusor o "celosía de cielo". Los *dampers*, pueden moverse de forma manual o automatizada a partir de motores de bajo consumo (figura 4).

Figura 4: Windcatcher™, de Monodraught. A la izquierda se aprecian las celosías exteriores, mientras que a la derecha se visualizan los divisores internos que fraccionan el sistema de ingreso y egreso de aire en cuatro cuadrantes.

Cabe señalar que la evolución de las torres modernas ha tomado como base un prolífico trabajo de investigación (12, 13). Lo anterior ha permitido establecer que el viento es la principal fuerza motriz de su funcionamiento, la cual aporta con un 76% más a la ventilación interna que lo que aporta el flujo impulsado por flotación (14). Complementando lo estabelecido, se plantea que los efectos de la flotabilidad pueden despreciarse para velocidades de viento superiores a 2 m/s (15). En lo que refiere al desempeño de las torres (16) exploró las respuestas a la calidad de aire, concluyendo aportes significativos, mientras que (17) se centró en el aporte de la torre en el control de las temperaturas interiores. En cuanto su forma, se evidenció que la torre de planta cuadrada presenta mejor rendimiento que la de planta circular (18). Respecto a la ubicación se establece la efectividad de situar la torre en la cara más expuesta del techo, definiendo al área central de la techumbre con mayor altura como el punto con más alto desempeño (19). Por otro lado, trabajos como (12) han debatido respecto al ángulo más eficiente para las celosías externas, responsables de la captación y evacuación del flujo de aire. Mientras que (20) ha analizado los ángulos que deben tomar los *dampers* internos para regular de forma óptima los flujos de entrada y salida al recinto asistido por la torre.

Si bien es posible evidenciar los avances del trabajo científico en torno a la torre de viento, estos se han centrado en su configuración como elemento y en su rendimiento, profundizando en parámetros como forma, dimensión, orientación, ubicación en la techumbre, celosías externas y *dampers*. Sin embargo, se detecta una brecha de conocimiento poco explorada que guarda relación con la integración de variables urbanas y arquitectónicas al análisis de desempeño de la torre de viento. Es en esta área que este trabajo se sitúa, estableciendo como objetivo principal de investigación la evaluación del potencial de ventilación natural entregado por una torre de viento a partir de las condiciones de ventilación que presentan las viviendas configuradas bajo la lógica de conjuntos residenciales o condominios; ponderando en el análisis el impacto de las edificaciones próximas, orientación y niveles de exposición a los vientos por parte de las viviendas.

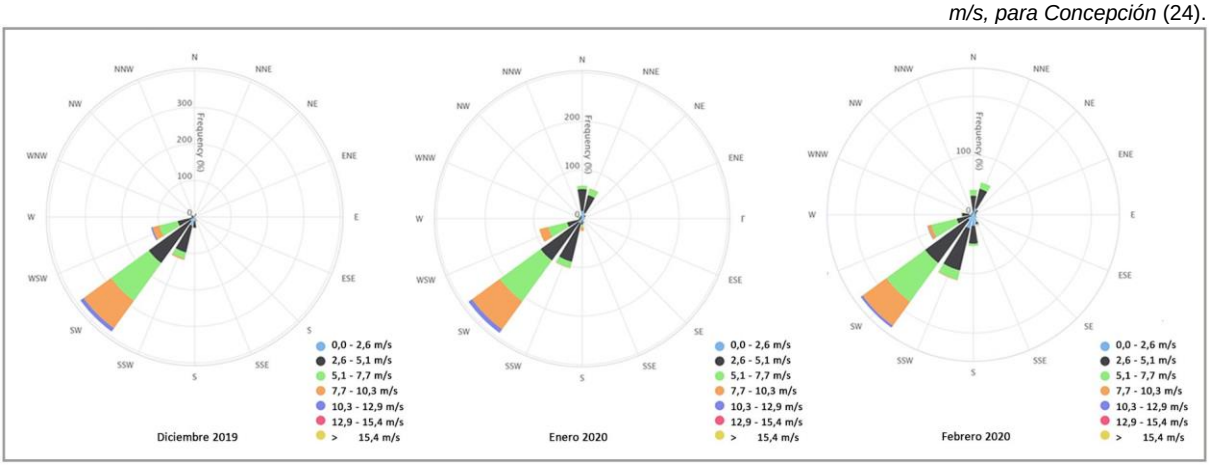
METODOLOGÍA

Caso de estudio

El área de estudio se enfocó en la ciudad de Concepción, Chile, localizada a 36°50’ de latitud Sur y 73°02’ de longitud Oeste. Con un clima de transición entre el clima mediterráneo y el templado húmedo con influencia oceánica, presenta una temperatura máxima media de 22,8°C registrada en el mes de enero, así como intensidades medias de viento en torno a los 7 m/s para los meses cálidos con predominante dirección suroeste (figura 5), alcanzando un valor de 7,7 m/s en el mes de enero de acuerdo a la NCh 1079-2019 (21). Si bien las temperaturas son moderadas, eventualmente se registran temperaturas superiores a los 30°C en el mes de enero, según datos de la dirección meteorológica de Chile. En torno a esto, cabe señalar que para el caso de las viviendas en Concepción, el resultado combinado de las ganancias internas, los aportes solares y la dificultad de evacuación del calor a través de la ventilación, genera problemas de sobrecalentamiento en verano (2). Por otra parte, Concepción se sitúa entre las ciudades altamente vulnerables al fenómeno de sobrecalentamiento producto del cambio climático, ya que en este tipo de ciudades el foco del acondicionamiento de

sus edificios ha sido puesto tradicionalmente en la conservación del calor en invierno y no en las estaciones cálidas (22). Sin embargo, Concepción en su calidad de ciudad costera posee, por su régimen de viento, un alto potencial para ventilar y enfriar naturalmente (2, 23), lo cual brinda el principal requisito para la utilización de torres de viento.

Figura 5: Dirección predominante del viento en los meses cálidos y rangos de intensidad en m/s, para Concepción (24).

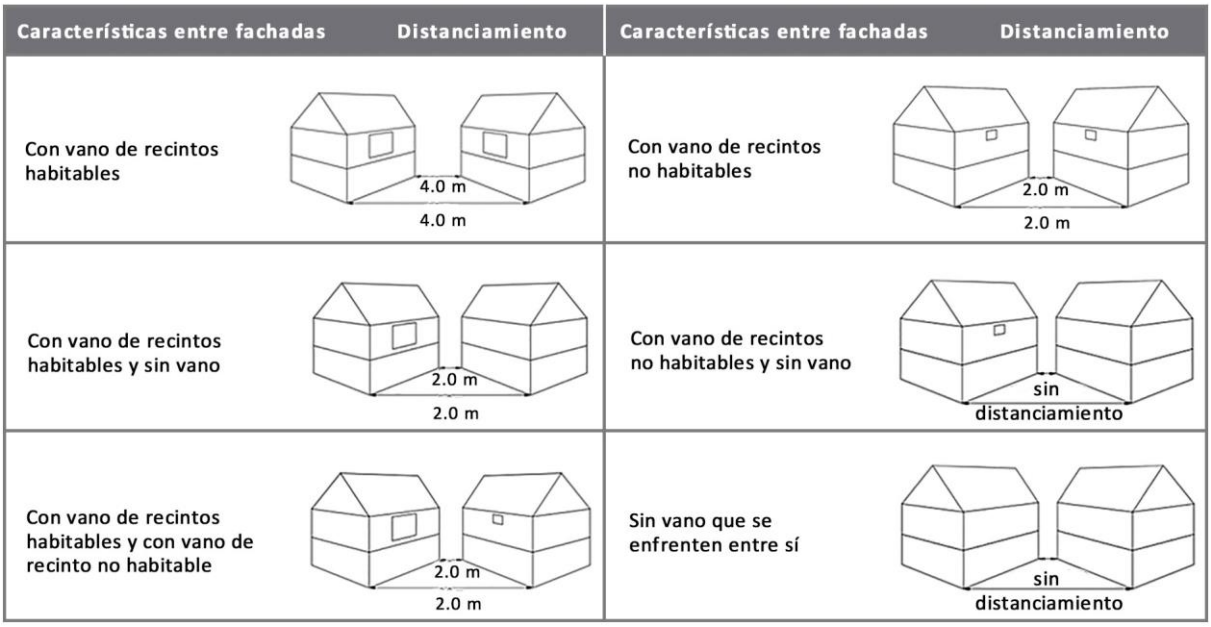


Con respecto al caso de estudio, este se centró en edificaciones residenciales con bajas oportunidades de ventilación natural a través de sus fachadas y con potencial riesgo de sobrecalentamiento. Para ello se seleccionó el modelo de vivienda proyectada en condominios o loteos de construcción simultánea, los cuales generan condiciones de proximidad entre unidades, que dificultan el aprovechamiento de los flujos de aire exterior a través de sus ventanas. Dicha tipología de viviendas obedece al modelo de barrios cerrados situados en las zonas periurbanas de las principales ciudades del país (25), caracterizados por ocupar una extensa cantidad de terreno con una gran cantidad de lotes con viviendas iguales o muy parecidas entre sí, generando un paisaje de repetición (26) (figura 6).

Figura 6: Condominios de Lomas de San Sebastián, zona de expansión residencial de la comuna de Concepción (27)

Respecto a la configuración de las viviendas, estas se desarrollan generalmente en uno o dos niveles más un ático, minimizando la superficie construida en el terreno. Entre los esquemas básicos de distribución para el modelo de condominio, el más recurrente está dado por las viviendas que enfrentan sus fachadas principales a un área de circulación o de uso común del conjunto, dejando el menor distanciamiento lateral entre ellas, con el fin de privilegiar la superficie de cada sitio y dar cabida a un patio posterior. Lo anterior responde a una ecuación desarrollada por el sector inmobiliario a partir de lo permitido por la O.G.U.C. en el artículo 4.1.15 (28), que posibilita distanciamientos mínimos entre fachadas para conjuntos de viviendas de hasta tres pisos de altura (figura 7). Dichas condiciones favorecen la proximidad lateral entre viviendas, dejando en muchos casos fachadas laterales sin vanos o bien con vanos de recintos no habitables, reduciendo o imposibilitando con esto las opciones de generar ventilación natural en este sentido. Por otra parte, la fachada frontal y posterior concentran las ventanas, y con ello, mayores posibilidades de conseguir ventilación cruzada, sin embargo, la proximidad entre los frentes de las viviendas producto del modelo de condominio, tampoco garantiza la exposición de dichas fachadas a los flujos de viento.

Figura 7: Distanciamiento mínimo entre fachadas en viviendas en conjunto, según artículo 4.1.15 O.G.U.C (28)



En lo que refiere a la tipología de las viviendas, estas no difieren radicalmente entre si, predominando los techos a dos aguas (figura 8). Desde el punto de vista constructivo, los primeros niveles son concebidos en hormigón armado o albañilería, mientras que el nivel superior es desarrollado en materialidad liviana estructurada en madera o acero galvanizado. Esto último implica que los niveles superiores o ático cuentan con baja masa térmica, representando un factor de riesgo al sobrecalentamiento, lo cual se ve acrecentado por la especificación de materiales del revestimiento de cubierta con baja reflectancia, como tejuela asfáltica o de zinc gravillado en colores oscuros, que potencian las altas temperatura tras ser calentados por la radiación solar

en verano (29). De esta manera, el ático se presenta como el área de mayor vulnerabilidad al fenómeno de sobrecalentamiento, dada su ubicación y materialidad. Sin embargo, al mismo tiempo cuenta con un gran potencial de enfriamiento a partir de ventilación natural, ya que se encuentra próximo a los flujos exteriores más favorables.

Figura 8: Tipología de viviendas en condominios, zona de expansión residencial de la comuna de Concepción.

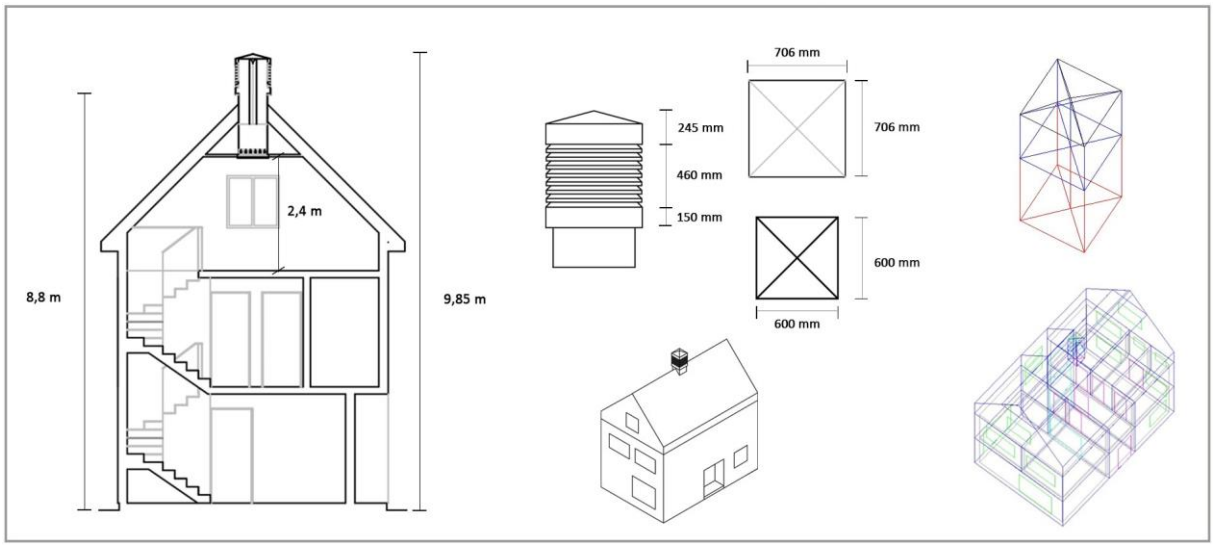
Proceso de simulación

Para establecer el desempeño de la torre de viento en función de las variantes que implica un conjunto residencial, se realizó un análisis comparativo entre la vivienda sin torre de viento y la vivienda con torre incorporada mediante simulaciones a través de software, integrando el análisis de flujos exteriores al del ambiente interior del caso de estudio. Lo anterior se convierte en un parámetro relevante puesto que la distribución de la presión inducida por el viento en las superficies del edificio está directamente asociada a las tasas de cambio de aire en los ambientes interiores, y con ello al consumo de energía, confort térmico y la calidad del aire (30). En el caso de la presente investigación se propuso desarrollarlo a partir de las condiciones disponibles dentro de un mismo paquete de software. Para ello se seleccionó el software IES, el cual además de cumplir con estándares aprobados como ASHRAE 140: 2001, 2004, 2007, 2014; CIBSE TM33; UNE EN 13791: 2000, ha realizado un trabajo en conjunto con la firma *Monodraught* Ltd, responsable de la torre de viento comercial denominada *Windcatcher*™, generando modelaciones de esta última dentro de sus componentes de análisis,

aportando mayor precisión a la geometría del modelo, reduciendo errores por efecto de este proceso.

La modelación del caso de estudio para la simulación se basó en un modelo simplificado derivado de la tipología representativa de viviendas de condominio en el área de análisis. Dicha vivienda está desarrollada en una primera planta de 47,46 m^2, una segunda planta de 47,46 m^2 y una tercera planta en ático con un recinto único de 27,43 m^2. Los primeros dos niveles fueron materializados a partir de muros estructurales de albañilería de ladrillos reforzada, contando con losa de hormigón armado entre el primer y segundo nivel. El tercer nivel o ático fue materializado en base a estructura de madera en muros perimetrales y entrepiso. Respecto a la torre de viento, se consideró al *Windcatcher*^{TM} producida por la empresa *Monodraught*, el cual cuenta con el respaldo científico a través de investigaciones centradas en su desempeño (15, 17). En lo específico se seleccionó el modelo recomendado por el fabricante para el volumen de aire a asistir por el dispositivo. De acuerdo a esto, se especificó el *Windcatcher*^{TM}, *Square - Classic 95*, el cual cubre un rango de superficie de 0 - 50 m^2 con una altura máxima de piso a cielo de 3,0 m en concordancia con el ático donde se centra el estudio, que presenta 27,43 m^2 con una altura de piso a cielo de 2,4 m (figura 9)

Figura 9: Izquierda, sección de la vivienda con Windcatcher. En el centro, medidas del windcatcher. Derecha, modelo 3D en IES.

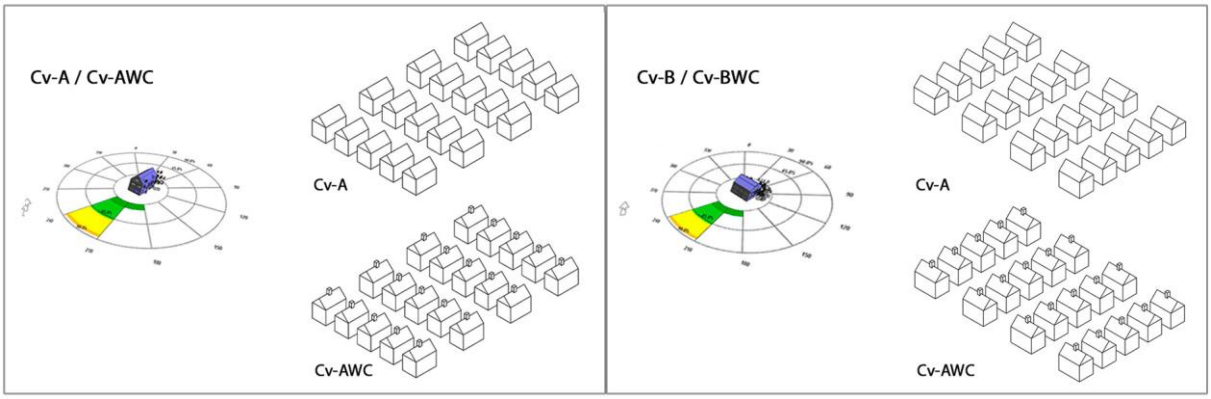


La evaluación del potencial de ventilación natural entregado por la torre de viento o *Windcatcher* de aquí en adelante, se llevó a cabo en dos etapas. La primera correspondió a la evaluación de las condiciones de ventilación disponibles para el caso de estudio en su formación de conjunto a partir del análisis de los flujos externos. Mientras que la segunda etapa se centró en la incidencia de los flujos externos en el interior de la vivienda, particularmente a nivel de ático, que es el área que presenta el mayor riesgo de sobrecalentamiento en verano, así como también la influencia directa del *Windcatcher*.

En lo que refiere a la metodología de la evaluación exterior, esta se desarrolló mediante MicroFlo, que es la herramienta de análisis CFD del software IES,

la cual permitió de manera ágil visualizar y cualificar el comportamiento de los flujos al exterior de la vivienda. Para ello se tomó como condición de base la proximidad entre viviendas y la configuración de sus aberturas de acuerdo al modelo de condominio seleccionado, donde la variable evaluada fue la orientación de las viviendas respecto al viento predominante en las épocas cálidas del año, contrastando las viviendas con y sin el uso del *Windcatcher*. El modeló contempló un grupo de 20 viviendas, de las cuales 4 se ubicaron en el sentido longitudinal y 5 en el sentido transversal de la vivienda, con el fin de contar con una cantidad de unidades que permitiera visualizar el impacto de las viviendas aledañas en el flujo del viento. Por otro lado, se definió una distancia de 4,0 m entre fachadas laterales de las viviendas y 12,0 m entre fachadas frontales. Lo anterior, se conjugó en una matriz de evaluación con 4 variables; la primera denominada “Cv-A”, es la evaluación del conjunto residencial orientado con sus fachadas frontales al flujo de viento predominante, mientras que la segunda simulación “Cv-B”, corresponde al conjunto de viviendas con la fachada lateral expuesta a dicho flujo. Las dos simulaciones restantes incorporaron el *Windcatcher* en las viviendas, repitiendo las condiciones de orientación a los vientos predominantes. Donde “Cv-AWC” es el conjunto de viviendas con Windcatcher incorporados, enfrentadas con sus fachadas frontales al flujo de viento y “Cv-BWC” recibiendo el flujo por las fachadas laterales (figura 10).

Figura 10: Esquema de matriz de evaluación exterior para el conjunto de viviendas.



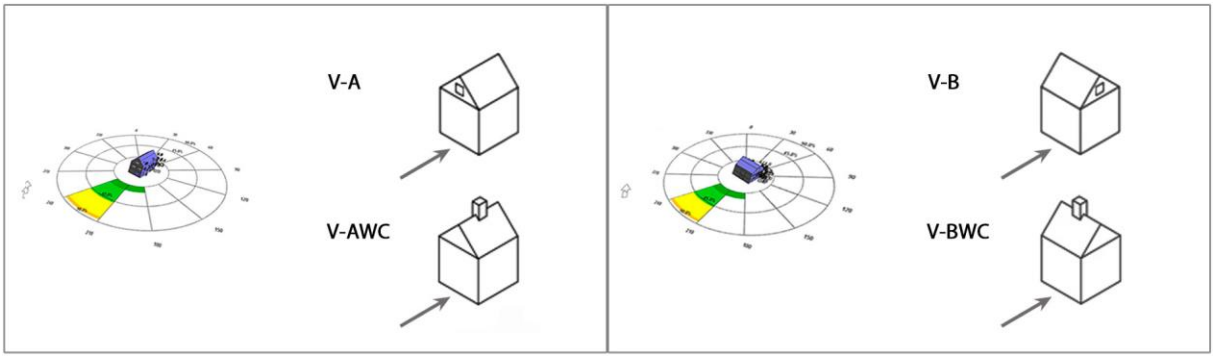
La simulación exterior realizada en MicroFlo es de carácter isotérmica y no considera aberturas entre el exterior y el interior del modelo. Además, esta aplicación no incorpora bases de datos meteorológicos, sino que se vale de los datos ingresados por el usuario como condiciones de borde al modelo de simulación. Según esto, para efecto del viento predominante se consideró la dirección sur-poniente, correspondiente al viento predominante para la estación de verano, mientras que para la velocidad se contemplaron 7,7 m/s que corresponden a la intensidad media del viento para el mes de enero, de acuerdo a lo registrado en la estación Carriel Sur de la ciudad de Concepción (21). En cuanto a los parámetros de exposición, MicroFlo de forma predeterminada considera 3 opciones que definen la forma de la capa límite del viento en relación a su entorno: Campo, Suburbio y Ciudad, seleccionando para efecto de este análisis, la opción de Suburbio, el cual se ajusta a zonas urbanas y suburbanas. Respecto a la configuración de la simulación, se utilizó el modelo de turbulencia “k-e”, el cual presenta resultados consolidados en este campo (14, 16). Por otra parte, en la configuración de cuadrícula se consideró un espaciado de 1,0 m y una

tolerancia de fusión de línea de cuadrícula de 0,1 m. Finalmente la extensión del dominio se definió según los parámetros recomendados por MicroFlo para este tipo de análisis. Esto es, a partir de los 8,8 m de altura de la vivienda, se define 5 veces la altura a barlovento; 15 veces la altura a sotavento y 5 veces la altura para los laterales y zona superior.

Con el conjunto de viviendas modelado, se realizó la primera etapa de la evaluación mediante MicroFlo, lo cual permitió obtener los flujos de aire alrededor de la vivienda, y a partir de ello, determinar los tipos de exposición con los coeficientes de presión asociados que incidieron en las aberturas de la evaluación interior.

La evaluación interior por su parte, se desarrolló a través de MacroFlo, que es la aplicación de IES responsable de evaluar la viabilidad de las estrategias de ventilación natural. Dicha aplicación recibió del análisis exterior los perfiles de exposición asignados tanto a las fachadas como a las aberturas que conforman el modelo. Integrando de esta manera las condiciones de contexto necesarias para definir las fuentes de ingreso de aire, como son las ventanas y el *Windcatcher* que sirven al ático de la vivienda analizada. A partir de los flujos ingresados en las aberturas antes mencionadas se determinó por comparación el impacto de la orientación de la vivienda respecto a los vientos predominantes. Esto quiere decir, a cuál de los dos tipos de abertura afectó más el cambio de orientación. Para ello se evaluó primero el desempeño de ambas ventanas abiertas como fuente de ingreso de aire al ático, contrastando la orientación de la vivienda que enfrenta con sus fachadas principales y por defecto sus aberturas al viento predominante “V-A”, respecto a la vivienda que recibe el viento de forma perpendicular a sus fachadas principales “V-B”. Las mismas orientaciones de la vivienda se aplicaron a la evaluación que consideró las ventanas cerradas, concentrando en el *windcatcher* la única fuente de ingreso de aire al ático “V-AWC” y “V-BWC” (figura 11).

Figura 11: Esquema de matriz de evaluación del comportamiento de flujos al interior de la vivienda.



En relación al simulador de MacroFlo, este trabaja con el flujo de aire impulsado por la presión del viento y las fuerzas de flotabilidad, utilizando un rápido solucionador de fluido térmico multizona que permite evaluar el desempeño de la ventilación natural, teniendo en cuenta datos de entrada tales como: geometría del modelo, aberturas, condiciones climáticas exteriores, así como también las condiciones de funcionamiento interior. Por ello se consideró la generación de zonas o habitaciones interiores con su

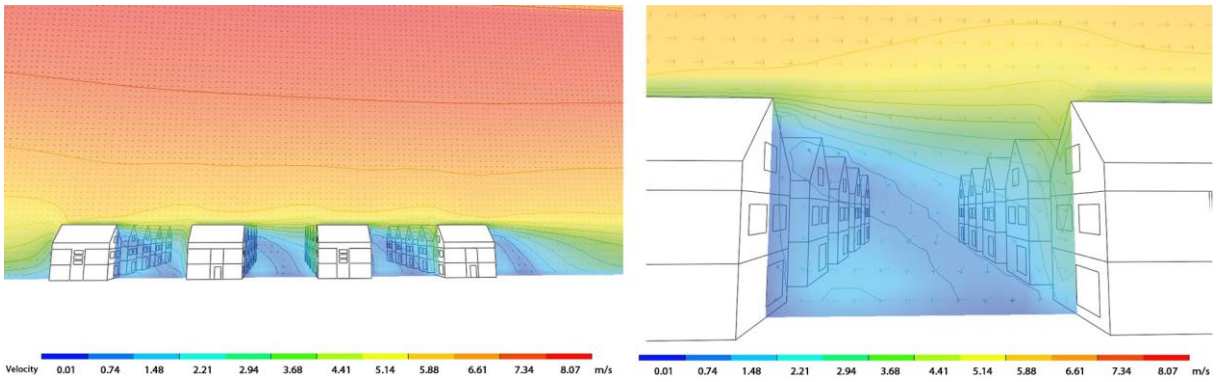
respectivas configuraciones y conexiones inter-zonales, para luego configurar las aberturas interiores y exteriores del modelo simplificado, de acuerdo a los antecedentes del caso de estudio. De este último también provienen las propiedades termo-físicas de los materiales, así como la capacidad de absorción solar y emisividad de las superficies, ingresados como datos de entrada. Respecto a las condiciones de clima para arrancar la simulación dinámica que requiere MacroFlo, se incorporó el archivo climático para la ciudad de Concepción (CHL_Concepcion.856820_IWEC.epw) disponible en la base del software EnergyPlus. Finalmente, para el análisis de ventilación interior proyectado se consideró un escenario climático cuyo criterio principal contempló las temperaturas elevadas, dado que éstas ocasionan sobrecalentamiento al interior de la vivienda, determinándose el mes de enero por registrar las mayores temperaturas anuales de acuerdo al archivo climático utilizado. Respecto a la selección de un día preciso de evaluación, éste respondió al promedio de las temperaturas máximas registradas durante enero, definiéndose el día 17 a las 16:00 h, que registró una temperatura máxima de 25^{o}C, una velocidad de viento máxima de 8,7 m/s con un ángulo de 230 deg en dirección de viento sur-poniente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concluido el proceso de simulación, se interpretaron los datos visualizados para determinar el potencial de ventilación natural a partir del comportamiento de los flujos de viento incidentes en el conjunto de viviendas frente a los vientos predominantes. Dicha interpretación es necesaria, puesto que la aplicación de CFD MicroFlo considera resultados gráficos, y no valores numéricos tabulados, para establecer la dirección y velocidad del flujo del aire externo que incide en las viviendas. Esto se visualiza a través de vistas en cortes 2D aplicados en cualquier zona de la cuadrícula que se estime conveniente analizar, donde la velocidad del flujo queda referenciada por rangos en m/s, asociados a colores, que abarcan las áreas que estén afectas a la velocidad referida. Por otra parte, el comportamiento del flujo es definido por líneas de contorno complementadas con vectores que colaboran en la visualización del fenómeno. Finalmente señalar que la velocidad de análisis para todas las simulaciones quedó fijada en 7,70 m/s, de acuerdo a lo establecido en la metodología.

La primera simulación correspondió a la evaluación del conjunto residencial con sus fachadas frontales expuestas al flujo de viento predominante Cv-A (figura 12). Donde se pudo apreciar en la vista lateral del conjunto, turbulencia del flujo y pérdida de velocidad del aire en el espacio generado entre viviendas, con un rango de disminución de velocidad de 5,88 m/s a 2,94 m/s, correspondiendo este último valor al recibido en la parte superior de la fachada, ya que a medida que se aproxima al primer nivel, la velocidad del aire disminuye al rango de 2,21 m/s. Por otra parte, sobre el área de la cumbrera el flujo se presentó de forma laminar y mantuvo la velocidad en el rango de los 5,88 m/s, a excepción de una zona de entre 20 y 30 cm, donde la velocidad disminuyó producto de la resistencia generada por la superficie (figura 12, derecha).

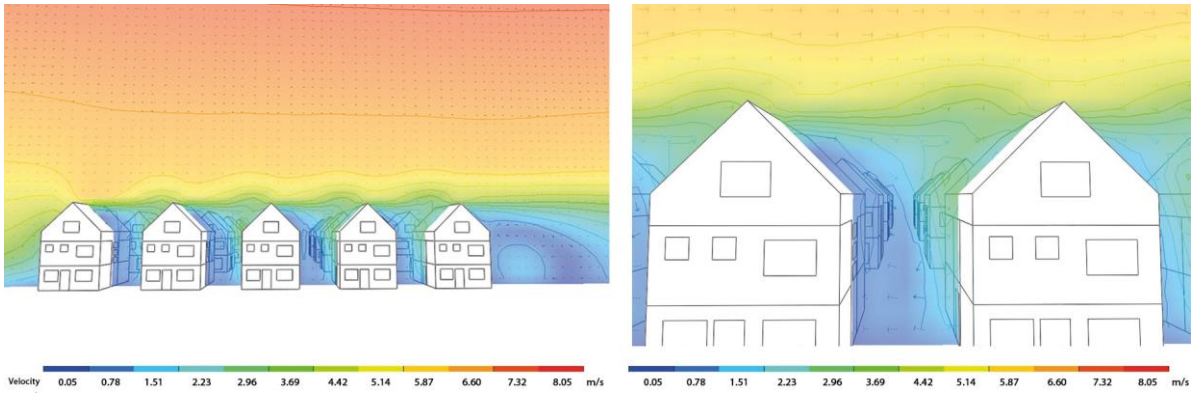
Figura 12: Análisis externo, caso de estudio con viento frontal a fachadas Cv-A.



Entre los hallazgos generados en la primera evaluación, se comprobó lo planteado por (8) referente al patrón de flujo que experimentan las viviendas densamente emplazadas, las cuales por su proximidad forman una superficie rugosa sobre la cual el viento fluye con poco desplazamiento vertical. Esto implica que el flujo alrededor de las fachadas se torna altamente turbulento y por defecto disminuye el potencial de ventilación cruzada a través de aperturas en las fachadas.

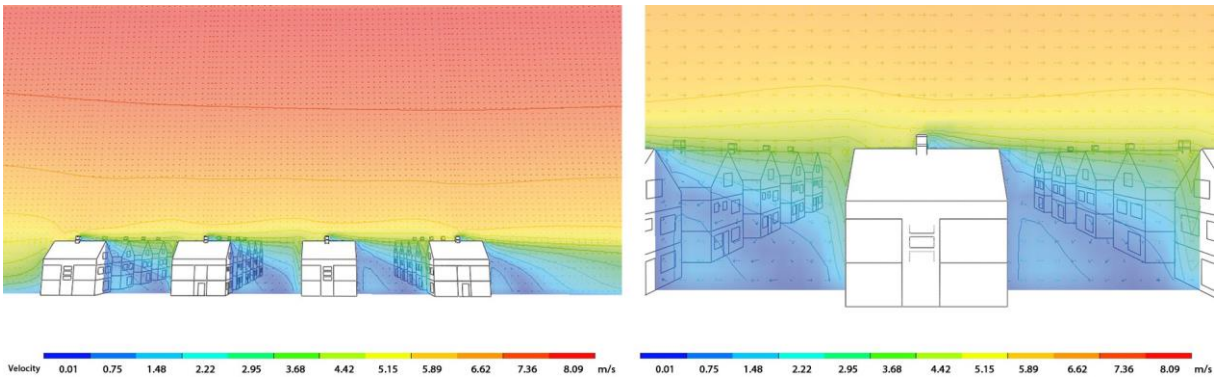
En la segunda simulación correspondiente al conjunto de viviendas con el viento predominante de forma lateral a las fachadas Cv-B (figura 13) se repitió el fenómeno de disminución de velocidad y turbulencia del flujo entre viviendas experimentado en la simulación anterior. Sin embargo, los rangos de velocidad disminuyeron de 5,14 m/s en la cumbrera a 1,51 m/s para la parte inferior de la fachada, apreciándose un comportamiento turbulento del flujo en la zona situada sobre las cumbreras, lo cual no solo disminuyó la velocidad, sino que también dio inestabilidad a los flujos (figura 13, derecha). Lo anterior puede atribuirse a la menor distancia entre viviendas y al tipo de obstáculo que representan las techumbres en sentido perpendicular al flujo del viento. Esto concuerda con lo planteado por (31) quienes, tras analizar los patrones de flujo sobre techos inclinados a dos aguas, establecieron que las áreas más extensas de recirculación y flujo inverso ocurren cuando el viento fluye perpendicular al sentido de las cumbreras, mientras que cuando fluye de forma paralela a estas, no se observa una separación significativa del flujo sobre los techos. De la misma manera el trabajo desarrollado por (32), advierte que, al tratarse de flujo perpendicular a la cumbrera en edificaciones próximas con techumbres a dos aguas, el campo de flujo evidencia una expansión del vórtice a niveles más altos entre las dos edificaciones analizadas, así como el aumento de la energía cinética turbulenta en la superficie de la cubierta en la zona de barlovento.

Figura 13: Análisis externo, caso de estudio con viento lateral a fachadas Cv-B.



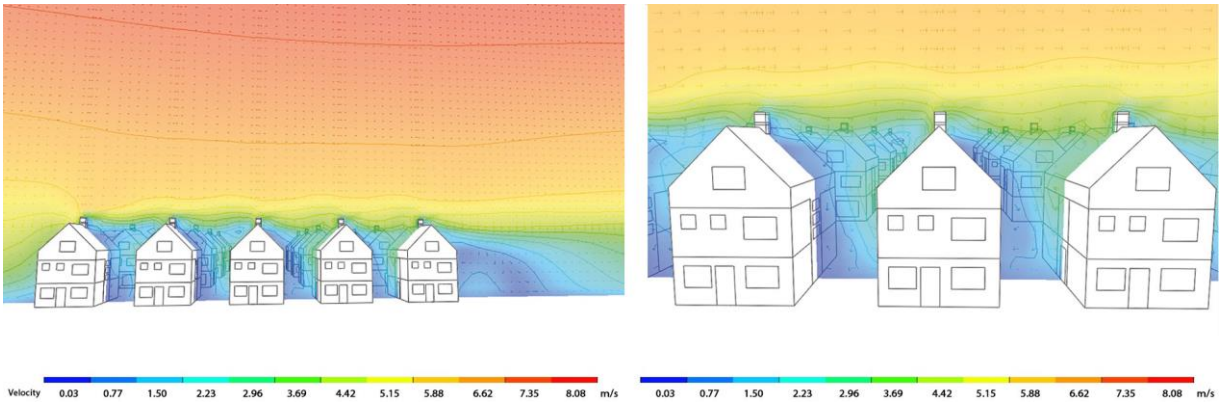
La simulación del caso Cv-AWC, que considera las viviendas con las fachadas frontales orientadas en dirección del flujo de viento predominante, contó con la incorporación de un *Windcatcher* cuadrado Classic 95, instalado en la parte superior de la cubierta (figura 14). Dicha ubicación derivó del comportamiento de los flujos observados en la simulación Cv-A, los cuales registraron en la zona de la cumbrera mayor velocidad de aire en comparación al resto de la edificación, concordando con los estudios que plantean que el mayor potencial de ventilación se encuentra en la parte superior de la techumbre (19, 33). Por otra parte, se consideró lo observado en la simulación Cv-A, que advierte que la zona de captación y evacuación óptima del *Windcatcher* se encuentra a 30 cm sobre la cumbrera, esto con objeto de evitar la zona que presentó disminución en la velocidad del flujo producto de la resistencia generada. Respecto a los resultados de la simulación Cv-AWC, estos presentaron disminución de la velocidad e inestabilidad del flujo entre viviendas, generando una caída de la velocidad de 5,15 m/s a 2,22 m/s para la zona de la fachada expuesta frontalmente al viento, mientras que el área de exposición a los vientos por parte del *Windcatcher* registró velocidades de 5,15 m/s, entregando un mayor potencial de captación que el disponible para ingreso a través de las ventanas de las fachadas (figura 14, derecha). Finalmente, se visualizó que el distanciamiento entre viviendas permite la estabilización del flujo tras el paso del viento por el *Windcatcher* de la vivienda vecina.

Figura 14: Análisis externo, caso de estudio con windcatcher incorporado y viento frontal a fachadas Cv-AWC.



La cuarta simulación Cv-BWC, correspondió a las viviendas con *Windcatcher* que enfrentan sus fachadas laterales a los vientos predominantes (figura 15). Al igual que el caso Cv-B, la velocidad del viento disminuyó entre viviendas, sumado al comportamiento irregular del flujo en la zona superior de las cumbreras. Sin embargo, a la hora de evaluar el flujo de aire en la zona del *Windcatcher*, se evidenció el impacto de que las viviendas vecinas contaran también con un *windcatcher* en la misma ubicación; dado que la cercanía de las viviendas y la desviación en el flujo producido por la orientación de la techumbre respecto al viento, generó una disminución notable en la velocidad de viento incidente en el *Windcatcher*, el cual registró 2,96 m/s.

Figura 15: Análisis externo, caso de estudio con windcatcher incorporado y viento lateral a fachadas Cv-BWC.



Ante el comportamiento de los flujos en la zona de captación del *Windcatcher* visualizado en la evaluación Cv-BWC se planteó una simulación adicional "Cv-BWC (a)", que a diferencia de Cv-BWC, no considera Windcatchers en las viviendas próximas (figura 16). Si bien esta característica no cambia las condiciones del viento y estabilidad de flujo entre viviendas, mejora la exposición a los vientos por parte del área de celosías de captación del *Windcatcher*, consiguiendo una velocidad de flujo del rango de los 5,15 m/s (figura 16, derecha) al no tener *Windcatcher* en la misma ubicación las casas vecinas. Finalmente, se realiza un cuadro resumen de los rangos de velocidad de viento para el análisis exterior de todas las variables (figura 17).

Figura 16: Análisis externo, caso de estudio con windcatcher incorporado y viento lateral a fachadas Cv-BWC(a).

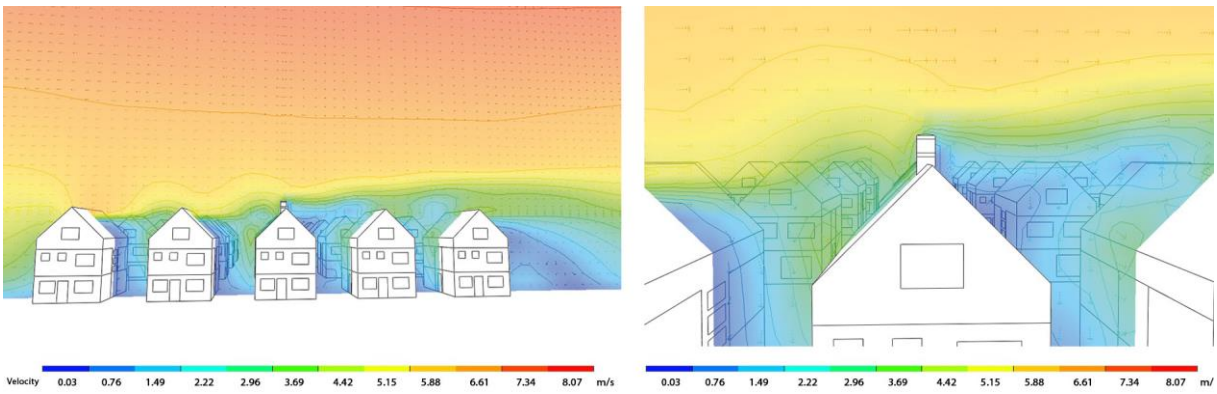
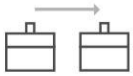
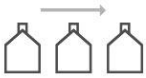
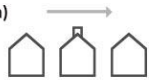


Figura 17: Cuadro resumen rangos de velocidad del viento incidente en fachadas y sobre cumbrera.

Variable	Rango velocidad del aire incidente desde la cumbrera hasta la parte inferior de la fachada (m/s)	Rango velocidad del aire incidente sobre la cumbrera (m/s)
Cv-A	5,88 – 2,21	5,88
Cv-B	5,14 – 1,51	5,14
Cv-AWC 	5,15 – 2,22	5,15
Cv-BWC 	2,96 – 1,50	2,96
Cv-BWC (a) 	5,15 – 1,49	5,15

Otro hallazgo significativo tras la evaluación exterior, es la definición de los coeficientes de presión para las aberturas, los cuales son ingresados como datos de entrada a la evaluación interior a través de categorías o “Tipos de exposición”, denominación que la aplicación MacroFlo asigna a los coeficientes de presión obtenidos en experimentos de túnel de viento para varios tipos de superficies de acuerdo a rangos de direcciones de viento. Los tipos de exposición caracterizan tanto los aspectos geométricos de la superficie, como el grado de protección por obstrucciones cercanas, condicionando los cálculos para los flujos de aire incidentes en ventanas, puertas y celosías. Traduciéndose en las categorías "expuesto", "semi-expuesto" y “protegido" según sean los grados de protección del edificio con respecto a otros edificios circundantes u obstrucciones. Por lo tanto, a partir de la disminución de los flujos incidentes en las fachadas a barlovento evidenciado tras la evaluación exterior del conjunto de viviendas, es posible asignar el tipo de exposición “protegido” para efecto de las ventanas en la evaluación interior y de “expuesto” en el caso del *Windcatcher*.

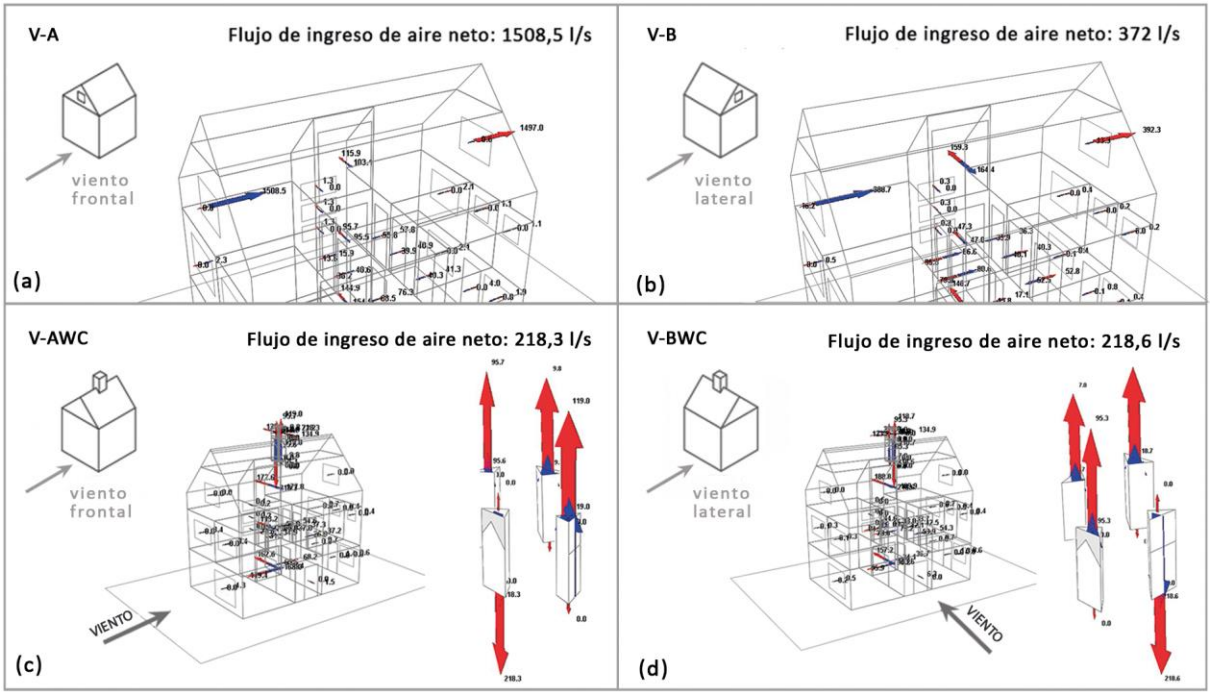
En cuanto a los resultados de las evaluaciones interiores, la variable analizada V-A correspondiente a la vivienda orientada frontalmente a los vientos predominantes y con ambas ventanas del ático abiertas, registró un flujo de aire neto de 1508,5 l/s, ingresado por la ventana que enfrenta al viento, que transformado a renovaciones/hora implica 57,10 (1/h), considerando los 95,1 m^3 de volumen del ático completo (figura 18a). Por su parte, la evaluación de la variable V-B correspondiente la vivienda orientada con el viento predominante impactando perpendicularmente a la cumbrera, registró un flujo de aire neto de 372 l/s, ingresados por las ventanas del ático, que traducido a renovaciones/hora implica 14,08 (1/h), considerando los 95,1 m^3 del ático. (figura 18b).

Respecto a los resultados de la evaluación centrada en el desempeño del *windcatcher* al interior del ático, se registró para la variable V-AWC, que presenta su fachada frontal a los vientos predominantes y ambas ventanas cerradas, un flujo de aire de 218,3 l/s, que transformado a renovaciones/hora

implica 8,26 (1/h), considerando los 95,1 m^3 del ático. Dicho flujo ingresó por el cuadrante del *Windcatcher* que enfrentaba al viento, mientras que los otros tres cuadrantes actuaron como flujos de egresos del aire interior del ático (figura 18c). Finalmente, para la variable V-BWC, que mantiene las mismas condiciones de V-AWC, exceptuando la orientación de la vivienda, ya que esta recibe los vientos predominantes de manera perpendicular a la cumbrera, registró un flujo de ingreso de aire a través del *windcatcher* de 218,6 l/s, que traducido a renovaciones/hora implica 8,27 (1/h), considerando los 95,1 m^3 del ático. Dicho flujo ingresó a través del cuadrante sur poniente, que enfrentaba los vientos predominantes, actuando los otros tres cuadrantes restantes como egreso (figura 18d).

Al analizar los resultados de ambas variables V-AWC y V-BWC, se puede determinar que para el *Windcatcher* la orientación de la vivienda no afecta su potencial de ventilación natural, dado que los flujos de aire ingresados evidenciaron una mínima diferencia. Esto último, atribuible a la división simétrica de los cuadrantes de ingreso o egreso dispuestos en forma de cruz, que invierten sus funciones dependiendo del lado que reciban el viento. Lo anterior contrasta con el desempeño de la ventilación a través de las ventanas, donde el cambio de orientación sí afectó significativamente los flujos de aire ingresados (figura 18).

Figura 18: Resultados de los flujos tras el cambio de orientación de la vivienda. En la parte superior en las variables V-A y V-B los flujos de aire ingresan por ambas ventanas, mientras que en la parte inferior en las variables V-AWC y V-BWC, los flujos de aire ingresan únicamente a través del Windcatcher.



CONCLUSIONES

Los antecedentes recopilados en torno al caso de estudio de esta investigación no solo confirman la necesidad de incorporar estrategias pasivas de ventilación a las viviendas pertenecientes al modelo de condominio existente, sino que abre el debate respecto a la falta de criterios de diseño en los conjuntos que garanticen la ventilación natural para sus unidades. Reconociendo dentro de estas consideraciones los distanciamientos entre unidades, su orientación en relación a los vientos predominantes y finalmente el diseño de la vivienda propiamente tal. Entre los problemas más reconocibles, se advierte la dificultad en el aprovechamiento de los flujos exteriores de aire a través de las ventanas, dada la reducida distancia con que se emplaza una vivienda de la otra, particularmente entre fachadas laterales, las que para minimizar aún más su distanciamiento generan fachadas prácticamente ciegas, amparadas en la normativa para este tipo de conjuntos. Esto último minimiza las oportunidades de ventilación en el caso de contar con vientos que enfrenten las fachadas laterales, a diferencia de las fachadas frontales que sí cuentan con posibilidad de ventanas. Por otra parte, se observa que el modelo de condominio tiende a la estandarización, repitiendo fórmulas tanto para el diseño del conjunto como para las viviendas. Dicha condición ofrece una oportunidad respecto al potencial uso de la ventilación natural, ya que todas las viviendas poseen prácticamente la misma altura y son parte de conjuntos que se extienden en grandes superficies de terreno, permitiendo el flujo casi ininterrumpido del viento sobre sus cumbreras, el que puede ser aprovechado por un sistema de captación y evacuación vertical, como las torres de viento.

Las simulaciones realizadas al conjunto de viviendas comprobaron lo señalado por la literatura respecto a la disminución del potencial de ventilación y al comportamiento turbulento del flujo en el espacio generado entre viviendas, presentando valores de velocidad de viento considerablemente menores en fachadas que las registradas a nivel de cumbreras. Este último dato confirma el potencial de ventilación natural que poseen las torres de viento ubicadas sobre el nivel de las cubiertas, determinando para el caso de estudio, una altura óptima de captación de 30 cm por sobre el límite superior de la cumbrera, con el fin de evitar la perturbación del flujo producido por la resistencia que ofrece la superficie de la cubierta en esta zona.

Otro aspecto que la evaluación exterior del conjunto arrojó fue el impacto de su orientación respecto a los vientos predominantes, evidenciando una disminución del potencial de ventilación para las fachadas de las viviendas con flujo incidente de manera lateral en comparación a aquellas que lo recibían en sus fachadas frontales. La mayor proximidad de las primeras, sumado a la desviación del flujo que provoca la forma de las cubiertas, generó mayor turbulencia y disminución de la velocidad del aire, afectando no solo las fachadas, sino que también el potencial de ventilación de la torre de viento, particularmente cuando se tienen torres en las viviendas vecinas. Esto obliga a repensar la movilidad de la torre dentro de la planta de las viviendas o bien reconsiderar la alineación estricta de las viviendas cuando el viento de verano tiene una dirección constante. En cambio, para el caso de las viviendas que estaban orientadas con sus fachadas frontales a los vientos predominantes y además contaban con una mayor distancia entre si, no se generaron interferencias de flujo entre torres vecinas.

Respecto a los flujos al interior de la vivienda, al evaluar el ático del caso base con ambas ventanas abiertas, se constató que la orientación frente a los vientos predominantes genera impacto en los flujos ingresados, ya que la vivienda que recibió el viento de manera frontal a las fachadas con ventanas, obtuvo un flujo considerablemente mayor que aquellas que enfrentaron el viento con sus fachadas laterales. Sin embargo, al hacer la misma evaluación con las ventanas cerradas y la torre de viento operativa, esta última registró prácticamente el mismo flujo de ingreso independiente de la orientación del viento, confirmando la naturaleza multidireccional de captación de la torre.

Finalmente, se concluye el aporte de la torre de viento en la mejora de las condiciones de ventilación para viviendas con dificultades de captación de aire a través de sus ventanas o bien para generar ventilación natural segura con ventanas cerradas en ausencia de moradores. Dicho aporte es establecido a partir de las variables urbanas y arquitectónicas que determinan el caso de estudio, generando de esta manera conocimiento base para posteriores trabajos que profundicen en el confort térmico o la calidad del aire interior entregada por una torre de viento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a *Monodraught Ltd* por la información facilitada para esta investigación.

REFERENCIAS

1. SANTAMOURIS, M., CARTALIS, C., SYNNEFA, A. y KOLOKOTSA, D. On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings - A review. *Energy and Buildings* [en línea] 2015. vol. 98, p. 119‑124. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.052

2. PALME, M., GALVEZ, M., CARRASCO, C. Estimación del riesgo de sobrecalentamiento y del potencial de refrigeración por ventilación natural de viviendas unifamiliares en ciudades costeras de Chile. *Revista Hábitat Sustentable*. 2016. Vol. 6, no. 2, p. 52-61. ISSN 0719-0700.

3. IPCC, 2014: Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs.

4. OKE, T., MILLS, G., CHRISTEN, A., VOOGT, J. *Urban Climates*. Cambridge University Press, 2017. ISBN 9780521849500.

5. HE, B.J., DING, L. y PRASAD, D. Enhancing urban ventilation performance through the development of precinct ventilation zones: A case study based on the Greater Sydney, Australia. *Sustainable Cities and Society* [en línea]. 2019. vol. 47, no. February, p. 101472. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101472.

6. PALME, M., CARRASCO, C., ÁNGEL GÁLVEZ, M. y INOSTROZA, L. Natural Ventilation: A Mitigation Strategy to Reduce Overheating in Buildings under Urban Heat Island Effect in South American Cities. En: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. República Checa, 2017. DOI 10.1088/1757-899X/245/7/072046.

7. BROTAS, L. y NICOL, F. Estimating overheating in European dwellings. *Architectural Science Review* [en línea]. 2017 vol. 60, no. 3, pp. 180‑191. Disponible en: https://doi.org/10.1080/00038628.2017.1300762.

8. ETHERIDGE, D. *Natural ventilation of buildings theory, measurement and desing*. Wiley, 2012. ISBN 9780470660355.

9. BAHADORI, Mehdi. DEHGHANI-SANJI, Alireza, SAYIGH Ali. *Wind Towers - Architecture, Climate and Sustainability*. Suiza, Springer, 2014. ISBN 3319058754.

10. HOSSEINI, S., SHOKRY, E., AHMADIAN HOSSEINI, A., AHMADI, G. y CALAUTIT, J. Evaluation of airflow and thermal comfort in buildings ventilated with wind catchers: Simulation of conditions in Yazd City, Iran. *Energy for Sustainable Development* [en línea]. 2016. vol. 35, p. 7-24. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2016.09.005.

11. SAHEBZADEH, S., HEIDARI, A., KAMELNIA, H. y BAGHBANI, A. Sustainability features of Iran's vernacular architecture: A comparative study between the architecture of hot-arid and hot-arid-windy regions. *Sustainability*. [en línea]. 2017. vol. 9, no. 5. Disponible en: https://doi.org/10.3390/su9050749

12. SAADATIAN, O., HAW, L., SOPIAN, K. y SULAIMAN, M. Review of windcatcher technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea]. 2012. vol. 16, no. 3, p. 1477-1495. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.037.

13. JOMEHZADEH, F., NEJAT, P., CALAUTIT, J., YUSOF, M.B.M., ZAKI, S.A., HUGHES, B.R. y YAZID, M.N.A.W. A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, Part 1: Indoor air quality and thermal comfort assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [en línea]. 2017. vol. 70, p. 736-756. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.254

14. HUGHES, B.R. y MAK, C.M. A study of wind and buoyancy driven flows through commercial wind towers. Energy and Buildings [en línea]. 2011. vol. 43, no. 7, pp. 1784-1791. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.022.

15. JONES, B.M. y KIRBY, R. Quantifying the performance of a top-down natural ventilation Windcatcher™. *Building and Environment* [en línea]. 2009. vol. 44, no. 9, p. 1925-1934. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.01.004.

16. CALAUTIT, J.K., O' CONNOR, D. y HUGHES, B.R. Determining the optimum spacing and arrangement for commercial wind towers for ventilation performance. *Building and Environment* [en línea]. 2014. vol. 82, p. 274-287. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.024.

17. JI, Z., SU, Y. y KHAN, N. Performance Evaluation and Energy Saving Potential of Windcatcher Natural Ventilation Systems in China. *International Journal of Architecture, Engineering and Construction*. [en línea]. 2012. vol 1, no 2, p. 84-95. Disponible en: http://dx.doi.org/10.7492/IJAEC.2012.010

18. MANESHI, M.M., REZAEI-BAZKIAEI, A., WEBER, A.S. y DARGUSH, G.F. A numerical investigation of impact of architectural and climatic parameters of windcatcher systems on induced ventilation. En: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. USA, 2012. ISBN 9780791845226.

19. HUGHES, B.R., CALAUTIT, J.K. y GHANI, S.A. The development of commercial wind towers for natural ventilation: A review. *Applied Energy* [en línea]. 2012. vol. 92, p. 606-627. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.066.

20. HUGHES, B.R. y ABDUL GHANI, S.A.A. A numerical investigation into the effect of windvent dampers on operating conditions. *Building and Environment* [en línea]. 2009. vol. 44, no. 2, p. 237-248. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.02.012

21. INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, INN. Arquitectura y Construcción - Zonificación climática y térmica para el diseño de edificaciones. NCh 1079. Of 2019. Chile, 2008.

22. LOMAS, K. y PORRITT, S. Overheating in buildings: lessons from research. *Building Research and Information*. [en línea]. 2017. vol. 45, no. 1-2, p. 1-18. Disponible en: https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1256136

23. AGENCIA CHILENA DE EFICIENCIA ENERGETICA. Guía de eficiencia energética para establecimientos educacionales. 2012. Chile. 351p

24. DIRECCIÓN METEOROLÓGICA DE CHILE. Servicios climáticos. *[en línea].* *https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/mensuales/viento18DireccionesMensual/360019/2020/12* *[consulta: 19 junio 2021].*

25. AZÓCAR G., PÉREZ L., SANHUEZA R., ALCAÍNO I. Desarrollo urbano y segregación socio espacial en el área metropolitana de Concepción, Chile. Tendencias y Perspectivas. En: PÉREZ L., HIDALGO R. (Eds.). Concepción metropolitano. Evolución y desafíos. 1a ed. Chile, Editorial Universidad de Concepción, 2010. pp. 171-188. ISBN: 978-956-14-1165-4.

26. PÉREZ, L., GONZÁLEZ, C. y SALINAS, E. Nuevas formas y nuevos contenidos. Nueve paisajes residenciales en el Área Metropolitana de Concepción (AMC), Chile. En: *X Coloquio Internacional de Geocrítica*. España, 2008. Disponible en: http://www.ub.edu/geocrit/-xcol/programa.htm

27. GOOGLE EARTH. Vista aérea condominios en Lomas de San Sebastían. Concepción. 2019. Localización 36º46'46.28"S 73º02'57.53"O, altura de la cámara 546 m.

28. DECRETO SUPREMO Nº 47. Ordenanza general de urbanismo y construcciones. Diario oficial de la Republica de Chile. Santiago, Chile, noviembre de 2020. 453p.

29. PARKER, D.S., SOLAR, F. y SHERWIN, J.R. Comparative Evaluation of the Impact of Roofing Systems on Residential Cooling Energy Demand in Florida. En: *Proceeding of the 2002 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*. Pacific Grove, USA, 2002.

30. BRE, F. y N., GIMENEZ, J.M. Hacia una herramienta basada en la nube para simular la ventilación natural en edificios: predicción de los coeficientes de presión. En: *Internacional Building Performance Simulation Association*. Argentina, 2019. ISBN: 978-987-47510-0-3

31. LEDO, L., KOSASIH, P.B. y COOPER, P. Roof mounting site analysis for micro-wind turbines. *Renewable Energy* [en línea]. 2011. vol. 36, no. 5, p. 1379‑1391. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2010.10.030.

32. HOSSEINI, S.H., GHOBADI, P., AHMADI, T. y CALAUTIT, J.K. Numerical investigation of roof heating impacts on thermal comfort and air quality in urban canyons. *Applied Thermal Engineering* [en línea]. 2017. vol. 123, p. 310‑326. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.095.

33. ABOHELA, I., HAMZA, N. y DUDEK, S. Effect of roof shape, wind direction, building height and urban configuration on the energy yield and positioning of roof mounted wind turbines. *Renewable Energy* [en línea]. 2013. vol. 50, p. 1106‑1118. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.068.

Submetido: 25/01/2021
Aceito: 24/06/2021