

DOCTORADO EN ARQUITECTURA Y URBANISMO



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

Tesis doctoral

Evaluación de estrategias de ventilación natural basadas en la integración de torres de viento al diseño arquitectónico de viviendas en climas templados

Autor: Nelson Arias Jiménez

Profesor Guía: Dra. Maureen Trebilcock Kelly

Profesor co-guía: Dr. Ariel Bobadilla Moreno

Concepción | Chile | 2020

Resumen

El calentamiento global se presenta en la actualidad como un desafío a escala mundial. Entre los efectos más perceptibles figura el aumento de las temperaturas globales promedio, lo cual trae consigo fenómenos climáticos extremos como olas de calor; responsables no solo de intensificar las alzas de temperaturas en las regiones cálidas, sino que de llevar temperaturas altas a zonas que hasta ahora no las experimentaban. A lo anterior, se suma el aumento de la temperatura del aire en entornos urbanos, a partir del fenómeno conocido como “isla de calor”, el cual por defecto repercute en el confort térmico de los ocupantes de las edificaciones, aumentando las demandas de enfriamiento. Si bien estas últimas pueden ser cubiertas a través de la ventilación natural, muchas veces ésta no puede ser aplicada, ya sea por no disponer de las aberturas requeridas, o bien, por no tener la exposición necesaria a los vientos predominantes.

Esta investigación toma como caso de estudio la tipología de viviendas de condominio en la ciudad de Concepción, cuyos áticos o niveles superiores están expuestos a riesgo de sobrecalentamiento debido a los materiales livianos con que están contruidos y a la baja reflectancia de sus cubiertas. Por otra parte, presentan dificultades para el aprovechamiento de la ventilación natural, ya que la proximidad entre viviendas impide la exposición adecuada a los vientos. Además, suma dificultad la disposición de los usuarios a mantener las ventanas cerradas por razones de seguridad en las horas de ausencia o durante la noche. Por lo tanto, frente a lo expuesto se plantea que un sistema de ventilación vertical basado en una torre de viento o windcatcher puede presentarse como solución, puesto que estos sistemas mediante su altura permiten captar las presiones de vientos locales por sobre los límites de las edificaciones, encausándolos al interior de la vivienda para evacuarlos finalmente a través de la misma torre.

Las torres de viento provenientes de la arquitectura tradicional de Medio Oriente, en su proceso de evolución han sido ampliamente investigadas, sin embargo, dichos estudios se han centrado en torno a su desempeño como elemento y el funcionamiento de sus partes. Ante lo cual, la presente tesis propone contribuir a un área de conocimiento poco explorada, que guarda relación con la integración de variables urbanas y arquitectónicas incidentes en el desempeño de las torres de viento. Para ello se realizó un análisis comparativo entre una vivienda con torre y otra sin torre de viento, aplicando una matriz de análisis que considera variantes tanto del conjunto como de la vivienda en su configuración interior y uso. Particularmente el estudio se centró en el ático por ser el recinto más expuesto y, por tanto, más

tendiente a sobrecalentamiento, además de contar con influencia directa de la torre de viento. Las evaluaciones fueron realizadas a través de simulaciones con el software IESVE, utilizando el módulo de CFD para análisis externos y mediante simulación termo-dinámica para obtener las temperaturas operativas interiores, las que posteriormente fueron evaluadas según el rango de confort establecido a partir del modelo adaptativo.

Los resultados confirman la efectividad de la torre de viento dada su naturaleza multidireccional, que le permite operar independiente de la orientación que tenga la vivienda respecto a los vientos. Por otro lado, demostró ser un aporte en la disminución de las temperaturas interiores, alcanzando su mejor desempeño en la opción del ático sin subdivisiones, para ir decreciendo acorde aparecen más recintos. Por último, la torre solucionó el problema de las ventanas cerradas, al permitir ventilación constante y segura, mientras que su influencia disminuyó cuando existía ventilación cruzada a través de las ventanas.

Palabras clave: Torres de viento, Ventilación natural, Enfriamiento pasivo, Confort térmico.

Abstract

Global warming currently poses a challenge of global proportions. Among the most perceptible effects we find the rise of mean global temperatures which in turn generate climate phenomena such as extreme heat waves, intensifying the rise of temperatures in warm regions as well bringing high temperatures to places which did not have them before. To this must be added the rise of temperatures in urban areas, a phenomenon known as the “urban heat island”, which in turn impacts the thermal comfort of building occupants, raising the demands for cooling. Although the latter can be met through natural ventilation, many times this cannot be applied due to either the absence of the mandatory openings or not having the necessary exposition to the predominant winds.

This research chooses as object of study the condominium typology dwellings in the city of Concepción, whose attics are exposed to risk of overheating due to them being built with light materials and also due to the low reflectance of their roofs. On the other hand, they present difficulties for the exploitation natural ventilation since the proximity between houses prevents from the right exposition to the winds. The dwellers’ habit of keeping the windows shut due to security reasons is a factor that must also be taken into account. In the face of all this, it is here argued that vertical ventilation based on wind towers systems or “windcatchers” can become a viable solution since, due to their height, they allow the harnessing of the pressure of local winds above the height limits of the buildings and their channelling into the interior of the dwellings as well as allowing their expulsion.

The traditional middle east wind towers and their evolution has been amply researched. However, this has been centred around their performance as an element and the functioning of its parts. In this context, this thesis proposes to contribute to the widening of the research field by means of including the architectural and urban variables involved in the wind towers performance. To this end, a comparative analysis was carried out between a case with tower and another one without wind tower, applying a matrix of analysis that takes into account the whole condominium as well as the interior spatial configuration of the house and its use. The study is particularly centred in the study of the attic due to it being the space that is most exposed and therefore, prone to overheating. Also, because it is directly affected by the presence of the wind tower. Simulations were carried out by using IESVE software, using the CFD model for external analysis and thermodynamic simulation with the aim of obtaining the interior operative temperatures which were later evaluated according to the perceived comfort range established by the adaptative model.

The results confirm the effectivity of the wind tower due to its multidirectional nature that allows it to operate regardless of the orientation of the house in relation to the wind directions. It also proved to be a contribution in bringing down interior temperatures, reaching its best performance in the attic without partition case and decreasing with the appearance of partitions. Lastly, in allowing for constant and safe ventilation, the tower solved the issue of closed windows, while its influence was diminished when crossed ventilation was achieved by means of opened windows.

Keywords: Wind catcher, Natural ventilation, Passive cooling, Thermal Comfort.

Índice

Resumen	1
Abstract	3
Capítulo 1.....	9
1.1 Introducción.....	9
1.2 Planteamiento del problema	12
1.3 Hipótesis	15
1.4 Objetivos.....	15
1.4.1 Objetivo general	15
1.4.2 Objetivos específicos	16
Capítulo 2.....	17
2.1 Principios y estrategias de la ventilación natural	17
2.1.1 Funciones de la ventilación.....	17
2.1.2 Ventilación natural, principios y estrategias.....	18
2.2 Sobrecalentamiento y confort térmico en viviendas.....	21
2.2.1 Cambio climático y su efecto en el sobrecalentamiento de las ciudades.....	21
2.2.2 El fenómeno de sobrecalentamiento en edificaciones.....	22
2.2.3 Factores que influyen en el sobrecalentamiento de edificaciones.....	23
2.2.4 Métodos para la estimación de confort térmico	26
2.2.5 Confort nocturno	33
2.2.6 Factores que dificultan la ventilación natural en viviendas.....	35
2.3 Las torres de viento como solución a la problemática de ventilación	38
2.3.1 Origen y funcionamiento las torres de viento en la arquitectura tradicional de Medio Oriente	39
2.3.2 Modernización de las torres de viento	45
2.3.3 Estudios de desempeño de las torres de viento modernas.....	50
Capítulo 3.....	59
3.1 Propuesta metodológica.....	59

3.1.1	Metodología de evaluación para abordar los objetivos del estudio.....	59
3.1.2	Condiciones del caso de estudio.....	60
3.2	Selección del software de simulación.....	61
3.2.1	Criterios de selección del software.....	61
3.2.2	Validación del software seleccionado.....	62
3.3	Metodología de evaluación del caso de estudio	62
3.3.1	Propuesta de integración de evaluación externa e interna del caso de estudio	62
3.3.2	Datos de entrada simulación	63
3.4	Modelo de confort térmico seleccionado para evaluación	65
3.5	Selección del dispositivo de ventilación (torre de viento comercial)	69
3.6	Esquemas metodología	70
3.6.1	Esquema general de la metodología propuesta para la investigación	70
3.6.2	Esquema matriz evaluación externa.....	71
3.6.3	Esquema matriz evaluación interna.....	72
Capítulo 4.....		76
4.1	Lugar de estudio	76
4.1.1	Condiciones geográficas y caracterización climáticas.....	76
4.1.2	Contexto urbano y edificatorio.....	78
4.2	Selección del caso de estudio	81
4.2.1	Condiciones de interés para el caso de estudio.....	81
4.2.2	Análisis de representatividad del caso de estudio.....	82
4.3	Caracterización del caso de estudio	84
4.3.1	Condiciones de la unidad habitacional	84
4.3.2	Condiciones del modelo de conjunto	86
4.3.3	Condiciones de la unidad habitacional y modelo simplificado	90
4.3.4	Materialidad y propiedades térmicas del caso de estudio	91
4.4	Evaluación experimental de las temperaturas interiores en un ático para la tipología estudiada	93
4.4.1	Condiciones de medición de las temperaturas interiores del ático.....	93
4.4.2	Análisis de resultados y conclusión.....	94
4.5	Especificaciones del dispositivo de ventilación (windcatcher) para el caso de estudio	98

4.6	Conclusiones capítulo 4	100
Capítulo 5.....		102
5.1	Definición del modelo 3D del conjunto residencial (caso de estudio).....	102
5.2	Condiciones de simulación del conjunto residencial	104
5.3	Variables del modelo para evaluación de los flujos externos.....	104
5.4	Datos de entrada análisis CFD (MicroFlo).....	105
5.4.1	Condiciones de viento (orientación, velocidad).....	105
5.4.2	Parámetros de simulación del análisis externo	106
5.5	Análisis de resultados simulación flujos externos	107
5.6	Conclusiones capítulo 5	115
Capítulo 6.....		118
6.1	Definición del modelo 3D y proceso de simulación	119
6.2	Datos de entrada simulación interior	120
6.2.1	Datos climáticos.....	120
6.2.2	Propiedades físicas - constructiva de los materiales	123
6.2.3	Condiciones de exposición al viento y valores de infiltración	124
6.2.4	Perfil de ocupación	125
6.2.5	Perfil de abertura de ventanas	126
6.2.6	Ganancias internas.....	127
6.2.7	Especificaciones Windcatcher.....	129
6.3	Evaluación de la incidencia de la orientación de la vivienda en el desempeño de la ventilación natural.	131
6.3.1	Evaluación del desempeño de la ventilación a través de las ventanas respecto a la orientación de la vivienda.....	131
6.3.2	Evaluación del desempeño del windcatcher respecto al cambio de orientación de la vivienda.....	134
6.4	Evaluación de las temperaturas interiores a partir de la incorporación del windcatcher	137
6.4.1	Proceso de evaluación de las temperaturas interiores.....	137
6.4.2	Análisis de confort térmico a partir de las temperaturas operativas resultantes	138
6.5	Conclusión capítulo 6.....	164
Capítulo 7.....		167
7.1	Conclusiones en torno al objetivo general	167

7.2	Conclusiones respecto a los objetivos específicos.....	170
7.3	Futuras líneas de investigación.....	175
	Índice de figuras	176
	Índice de tablas.....	180
	Bibliografía.....	182
	Anexos.....	194
	Anexo A: Temperaturas resultantes evaluación experimental ático.....	194
	Anexo B: Ganancias solares para variables A1a, B1a, A2a, B2a, A3a y B3a.....	198
	Anexo C: Temperaturas resultantes para las variables de la matriz de evaluación interna.....	200

Capítulo 1

Antecedentes

1.1 Introducción

En la actualidad el calentamiento global se presenta como un desafío a escala mundial, no solo porque sus consecuencias afectan directa o indirectamente a todos los habitantes del planeta, sino porque dicho fenómeno es causado principalmente por la actividad humana, según plantea el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático IPCC (2014). Entre los efectos más perceptibles figura el aumento de las temperaturas globales promedio, que implican que la atmósfera y el océano también se estén calentado gradualmente. Asimismo, se advierten cambios en los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, como por ejemplo la disminución de las temperaturas frías extremas, a cambio del aumento de las temperaturas cálidas extremas, lo cual intensificará las olas de calor donde ya se tiene ese problema y lo creará en otros donde no existe actualmente de acuerdo a las predicciones climáticas realizadas por Meehl y Tebaldi (2004).

A lo anterior, se suma el aumento de la temperatura del aire en entornos urbanos en comparación con las áreas rurales adyacentes, fenómeno conocido como “isla de calor”, el cual es causado por: la importante liberación de calor antropogénico; el excesivo almacenamiento de radiación solar en las estructuras de la ciudad; la falta de espacios verdes y sumideros fríos; la falta de circulación de aire en zonas urbanas; el efecto invernadero urbano producido por mayor radiación entrante de onda larga a la atmósfera urbana contaminada y más cálida; la evapotranspiración limitada generada por la reducción de superficies con capacidad de contención de humedad (Oke et al., 1987). Dicho aumento de las temperaturas afecta también el confort térmico de las edificaciones, incidiendo en las cargas de enfriamiento, las cuales según Santamouris M. (2014) son un 13% más altas en comparación con edificios similares en áreas rurales.

De esta manera, el sobrecalentamiento de los edificios es reconocido como uno de los problemas emergentes del cambio climático, con repercusión directa en la población, ya que implica que los edificios no logran proporcionar un refugio adecuado a las altas temperaturas (Nicol et al., 2012). Advirtiendo un impacto mayor de este fenómeno en edificios situados en climas templados, los cuales ponen su foco más en la conservación del calor en invierno que en el acondicionamiento en las estaciones cálidas (Lomas y Porritt, 2017). Esto último plantea un problema que deberá ser abordado debidamente dada la poca adaptación de las edificaciones y de sus ocupantes a las altas temperaturas.

Con respecto a las causas del sobrecalentamiento, si bien estas se vinculan mayormente a las ganancias de calor externas e internas que afectan a la edificación; existen factores, que pueden acrecentar o disminuir este fenómeno, tales como: el tamaño y orientación de las ventanas respecto a las ganancias solares; las estrategias de ventilación; el nivel de masa térmica de los materiales de construcción; el uso de materiales y colores de alta absorción. Para el caso de las ventanas, se debe controlar su tamaño y orientación; ya que, a mayor superficie expuesta al sol, mayor es el riesgo de sobrecalentamiento. En lo que concierne a las estrategias de ventilación, estas pueden ser un gran aporte para controlar las altas temperaturas, Oropeza-Perez y Østergaard (2014), en su análisis de factibilidad del uso de ventilación natural para enfriar una vivienda aquejada de sobrecalentamiento en un clima templado, no sólo comprobaron su contribución, sino que demostraron una reducción del 90% de las horas de posible uso de ventilación mecánica. Asimismo, Pomfret y Hashemi (2017) a partir de la evaluación a una vivienda en Reino Unido, establecieron el valor de la ventilación nocturna en el mejoramiento del confort térmico, la cual, en conjunto con el aumento de la masa térmica de los muros, redujo significativamente el riesgo de sobrecalentamiento.

En relación al último punto, cabe señalar que la masa térmica, tiene la capacidad de absorber las ganancias internas de calor, moderando las temperaturas interiores; sin embargo, Lomas y Porritt, (2017), advierten problemas asociados en el uso de materiales livianos y rápidos de montar en la construcción de viviendas, los cuales carecen de la masa térmica necesaria para aminorar los grandes cambios de temperatura causados por las ganancias internas y solares del verano. Finalmente, el último factor que influye en el sobrecalentamiento es la capacidad de absorción de calor de los materiales que constituyen las superficies exteriores, particularmente la cubierta. Frente a esto, Parker et al. (2002) plantearon que los techos residenciales son calentados por la radiación solar durante las horas del día, causando altas temperaturas al interior del aire del ático, lo cual es potenciado por la baja reflectancia de los materiales que la conforman, llegando a establecer que, en relación con un techo de tejas de

asfalto negro, un techo de tejas blancas reduce en un 76% el flujo de calor absorbido por el techo en verano.

Si bien el sobrecalentamiento afecta el confort térmico de los ocupantes, su impacto puede ser mitigado e incluso controlado con la aplicación de estrategias de ventilación natural; las cuales no solo ayudan a mejorar la cualidad habitable de los edificios sino que, además, ayuda a mejorar su eficiencia energética al reducir el uso de energía activa en refrigeración y ventilación. Esto último radica en que la ventilación natural basa su fuerza motriz, en las presiones generadas por la acción del viento y el efecto de flotabilidad (Etheridge, 2012).

En lo que respecta a la función exigible a los edificios de brindar confort térmico en verano a los ocupantes, Yarke y Marmet (2005) plantean que dicho objetivo puede cumplirse a través de la ventilación directa sobre las personas (ventilación de confort), y/o mediante la ventilación nocturna sobre la masa interna del edificio, siendo lo ideal combinar ambas estrategias. La primera, está vinculada a la posibilidad de abrir ventanas, permitiendo que el flujo de aire atraviese por aberturas externa e internas; que al aumentar el movimiento de aire durante verano puede proporcionar una mayor percepción de comodidad. Esto último, otorga a los ocupantes la opción de modificar su entorno térmico en busca de su bienestar y con ello establecer su rango de confort. Lo que según el modelo adaptativo definido por ASHRAE 55 (2017), opera vinculando las temperaturas de diseño interior (rangos de temperatura aceptables) con los parámetros meteorológicos o climatológicos locales exteriores.

En relación al desempeño de la ventilación natural, diversos estudios (Rijal et al. 2007; Ji et al. 2010; Palme et al. 2016; Cheng et al. 2018) han evaluado la capacidad de enfriamiento pasivo por medio de la ventilación en viviendas, detectando una alta capacidad de evacuación de calor a través de la ventilación natural; siempre cuando se presenten ciertas condiciones. Entre cuales destacan una favorable orientación de las viviendas respecto a los vientos; una distribución interna, que en colaboración con la disposición de las ventanas, permita que el flujo de aire recorra los espacios interiormente; además de un adecuado dimensionamiento de las aberturas. Algo similar ocurre con la ventilación nocturna, en que distintas investigaciones (Pomfreta y Hashemia, 2017; Exizidou et al. 2017; Solgi et al. 2018), establecen su aporte en la mejora del confort térmico de sus ocupantes, tanto de día como de noche; ya que al permitir el ingreso de aire fresco en las horas de la noche se liberan las ganancias de calor adquiridas por el edificio a lo largo del día; de esta manera el aire fresco que ingresa no solo impacta de forma directa en la temperatura del aire del recinto, sino que al tener contacto con la masa térmica de los materiales

que constituyen la edificación, estos se enfrían adquiriendo la capacidad de absorber calor en las horas venideras.

1.2 Planteamiento del problema

Si bien es posible controlar el sobrecalentamiento en edificaciones a través de estrategias de ventilación natural, no siempre se puede explotar el máximo potencial de ellas. Factores urbanos 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 seriamente las posibilidades de la ventilación urbana (Brotas y Nicol, 2017). Esto último, se hace evidente 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 por defecto disminuya el potencial de ventilación cruzada a través de las aberturas en las fachadas (Etheridge, 2012). Por otra parte, Mavrogianni et al. (2014), advierten el rol de los patrones de ocupación y conducta de los moradores respecto a la abertura de ventanas y con ello el control de la ventilación natural. Esto último cobra relevancia, cuando por factores de seguridad, las ventanas podrían mantenerse cerradas, ya que existe el temor de intrusión en las horas de ausencia o durante la noche, minimizando de esta forma la ventilación tanto diurna como nocturna.

En atención a las dificultades de la ventilación natural, antes indicadas, es que en la actualidad cobran sentido los sistemas de ventilación vertical como el que ofrecen las torres de viento o windcatchers. 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. Esto funciona sin importar si la orientación de las aberturas de la vivienda enfrenta a los vientos predominantes, puesto que, según lo planteado por Liu y Mak (2007) la torre funciona independiente de los cambios en la dirección del viento, captando y canalizando el aire fresco hacia las habitaciones por los mismos cuadrantes que eventualmente podrían evacuar el aire viciado que adquiere una mayor temperatura y menor densidad por lo que asciende naturalmente. Por otro lado, la torre de viento puede proporcionar ventilación

natural en ausencia de moradores, ya que logra funcionar con las ventanas absolutamente cerradas, lo que la hace mucho más segura además.

Si bien la torre de viento o windcatcher se presenta en la actualidad como una tecnología relativamente novedosa, su origen se remonta a un sistema milenario de acondicionamiento ambiental empleado por la arquitectura tradicional de Medio Oriente. Debiendo adaptarse a nuevas condiciones climáticas, así como al cumplimiento de las normativas vigentes de edificación, lo cual forzó la modificación tanto del diseño como de las dimensiones y materialidad del sistema original. Por otra parte, estos dispositivos, disponibles comercialmente, cuentan con un prolífico trabajo de investigación que les ha permitido posicionarse como una solución viable a los problemas de ventilación del presente escenario ambiental (Khan et al. 2008; Saadatian et al. 2012; Jomehzadeh et al. 2017). Utilizando para esto, tanto métodos de análisis experimental como teóricos, donde los primeros pueden realizarse través de pruebas in-situ o bien mediante modelos a pequeña escala en laboratorio; mientras que los teóricos van desde modelos numéricos a simulaciones, destacando entre estas últimas el desempeño de los modelos CFD (dinámica de fluidos computacional).

Los estudios realizados a las actuales torres de viento han permitido establecer que el viento es la principal fuerza motriz para su funcionamiento, la cual aporta con un 76% más a la ventilación interna, que lo que aporta el flujo impulsado por flotación (Hughes y Mak, 2011). Por su parte Calautit y Hughes (2014 a y b) exploraron el comportamiento del flujo ingresado al interior de un habitáculo, advirtiendo la importancia de la ubicación de la torre y la amortiguación del flujo para no provocar incomodidad en los ocupantes. Por otra parte, diversos estudios han explorado en el desempeño de las torres (Alshitawi et al. 2009; Calautit et al. 2014), se enfocaron en las respuestas a la calidad de aire, concluyendo aportes significativos, mientras que (Ji et al. 2012; Elmualim, 2006 b; Jones et al. 2008) se centraron en el aporte de la torre en el control de las temperaturas interiores. Maneshi et al. (2012) evaluaron el rendimiento de una torre con planta de forma circular en relación a una cuadrada, entregando mejores resultados la última. Por otro lado, autores como (Hughes y Ghani, 2010; Saadatian et al. 2012; Hughes et al. 2012) han debatido respecto al ángulo más eficiente para las celosías externas, responsables de la captación y evacuación del flujo de aire. Mientras que Hughes et al. (2009) 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 la configuración de la torre como elemento y su correspondiente rendimiento, profundizando en parámetros como: forma, dimensión, orientación, ubicación en la techumbre, celosías externas y dampers. Sin embargo, se detecta un área de conocimiento poco explorada, que guarda relación con la integración de variables urbanas y arquitectónicas que inciden en el desempeño de una torre de viento.

Tomando en consideración lo antes planteado, la presente tesis de investigación centra su interés en el estudio de variables tales como: el impacto de las edificaciones próximas; orientación y niveles de exposición a los vientos, por parte de las tipologías edificatorias; variaciones del diseño interior del o los recintos asistidos por una torre de viento, así como también la influencia de los patrones de usos, dados por las actividades de los ocupantes.

El área de investigación, se acotó a la ciudad de Concepción, la que posee un clima templado húmedo, siendo por lo mismo, según Lomas y Porritt (2017) altamente vulnerable al fenómeno de sobrecalentamiento producido por el cambio climático, ya que para este tipo de ciudades el foco para el acondicionamiento de sus edificios ha sido puesto tradicionalmente en la conservación del calor del invierno y no en el acondicionamiento en las estaciones cálidas. Lo cual exige necesariamente, migrar a un enfoque flexible para atender las crecientes necesidades de refrescamiento en verano producto del calentamiento global. Por otra parte, Concepción en su calidad de ciudad costera posee, por su régimen de viento, un alto potencial para ventilar y enfriar naturalmente (Palme et al. 2016), lo cual brinda el principal requisito para la utilización de una torre de viento.

Con respecto al caso de estudio, éste se centró en edificaciones residenciales, las cuales de acuerdo a la revisión de la literatura, representan menor cobertura en comparación a los estudios realizados para torres de viento en edificios de uso colectivo o públicos. Dejando una brecha de conocimiento, que cobra relevancia, dado el consumo energético que el parque residencial significa. En referencia a la tipología de vivienda se contempló una que represente y abarque las circunstancias que facilitan el sobrecalentamiento, así como también las dificultades de ventilación natural. Seleccionando para ello, el modelo de vivienda proyectada en condominios o loteos de construcción simultánea, los cuales generan condiciones de proximidad entre viviendas, dificultando de ésta forma, el aprovechamiento de la ventilación natural a través de sus fachadas, en concordancia con lo señalado por Etheridge (2012). Por otra parte, la tipología constructiva promovida por las inmobiliarias, considera materialidad liviana de

baja masa térmica para los niveles superiores o áticos, además de especificar revestimiento de cubierta de baja reflectancia, como tejuela asfáltica o de zinc gravillado en colores oscuros, los cuales potencian las altas temperatura tras ser calentados por la radiación solar en verano (Parker y Sonne, 2002).

Otro factor que suma riesgos de sobrecalentamiento al caso de estudio, de acuerdo a Nicol y Humphreys (2018), es la tendencia a cerrar las ventanas por seguridad en ausencia de moradores, lo cual cobra impacto en el caso particular de la vivienda, ya que a menudo los dormitorios se encuentran en los niveles superiores, siendo muy probable que cuando los moradores regresen, encuentren estos recintos calientes en verano en horas de la noche. A lo anterior se suma la concentración de aire caliente en los pisos superiores en horas de la noche, producto de la liberación de calor acumulado durante el día por los muros del primer nivel, ya que estos generalmente cuentan con mayor masa térmica.

Por consiguiente, la evaluación de desempeño de la torre de viento se centrará en los áticos de las viviendas, dado que éste junto con reunir numerosos factores de riesgo de sobrecalentamiento, es el recinto más próximo a la torre, razón por la cual será posible evidenciar de forma más directa su impacto en el control de las altas temperaturas.

1.3 Hipótesis

Es posible controlar el sobrecalentamiento del aire interior en áticos de viviendas de condominios urbanos en climas templados húmedos, que cuenten con bajas o nulas posibilidades de ventilación natural a través de sus fachadas, mediante la implementación de torres de viento (Windcatcher) debidamente adaptadas a las necesidades de ventilación y refrescamiento de las edificaciones locales.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar el potencial de la ventilación natural para controlar el sobrecalentamiento en viviendas de condominios urbanos de ciudades con climas templados al incorporar la tecnología de torres de viento al diseño de las viviendas en relación a su integración a la arquitectura y la agrupación urbana.

1.4.2 Objetivos específicos

OE 1: Identificar tipologías de viviendas y sus formas de agrupación que presenten bajas oportunidades de ventilación natural a través de sus fachadas, y que por tanto estén expuestas a riesgo de sobrecalentamiento en áticos o niveles superiores. Seleccionando y caracterizando un caso de estudio a partir de sus condiciones de materialidad y agrupación urbana.

OE 2: Analizar el comportamiento de los flujos exteriores incidentes en las fachadas de viviendas que formen parte de conjuntos residenciales, con el fin de establecer perfiles de exposición al viento aplicables al caso de estudio.

OE 3: Establecer directrices que definan la orientación y distanciamientos óptimos de viviendas dentro de un conjunto residencial, en función de las condiciones de captación de los flujos exteriores demandados por una torre de viento.

OE 4: Evaluar el desempeño de la torre de viento como estrategia de ventilación natural para el control de las temperaturas interiores del ático.

OE 5: Establecer parámetros de diseño para los configurantes del espacio ático y su relación con la torre de viento, en función del control de las temperaturas interiores en temporadas cálidas.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1 Principios y estrategias de la ventilación natural

2.1.1 Funciones de la ventilación

Si bien la función básica de la ventilación es asegurar la calidad óptima del aire interior y brindar confort térmico a sus ocupantes durante el verano; es posible agregar como ítem independiente el rol que cumple en el control de la humedad, la cual puede transformarse en un grave problema tanto en climas cálidos como fríos.

En lo que respecta, a la función de asegurar la calidad óptima del aire interior, ésta se considera de primer orden, puesto que, al no existir las renovaciones mínimas de aire, podrían ocurrir problemas en la salud de los ocupantes. De esta manera la ventilación natural como estrategia para lograr niveles óptimos de calidad de aire interior, está basada principalmente en la cantidad de aire fresco suministrado al espacio interior y la dilución de la concentración de los contaminantes (Yarke y Mermet, 2005).

Por otra parte, la función de regular el confort térmico en verano, puede ocurrir por medio de la ventilación directa sobre los ocupantes o bien a través de la ventilación nocturna sobre la masa del edificio. La primera, opera cuando el calor generado por las personas es transferido al flujo de aire, dependiendo directamente de la velocidad del aire y de la humedad relativa del ambiente. De esta forma, el desempeño de la ventilación natural se relaciona con el clima predominante y con las expectativas de confort térmico de los ocupantes (CIBSE A10). Además, la ventilación colabora con la eliminación del calor almacenado al interior del edificio a causa de las ganancias internas (personas, equipos, iluminación) y de los aportes solares, colaborando con la calidad del ambiente térmico y evitando el sobrecalentamiento.

Por último, se destaca la función en la migración de humedad del ambiente y el secado de las superficies interiores; ya que, en el caso de climas fríos, una ventilación deficiente sumada a una alta producción de vapor de agua por parte de los usuarios en el ambiente interior, repercutirá en riesgo de condensación superficial dando paso a la formación de moho, afectando directamente la salud de sus ocupantes. Por otra parte, en el caso de que la condensación superficial trascienda a condensación intersticial, la saturación de humedad en los materiales aumentará su conductividad térmica, disminuyendo su capacidad de aislación térmica y por defecto el confort interior (Arias y Bobadilla, 2016).

2.1.2 Ventilación natural, principios y estrategias

Se entiende por ventilación natural, cuando el motor de movimiento del aire es originado por fuerzas naturales y no proveniente de equipos mecánicos. Existiendo dos fuerzas motrices elementales que dan cabida a la ventilación natural, la primera tiene como propulsor al viento y la segunda el efecto de flotabilidad (Etheridge, 2012). Dichas fuerzas, en mayor o menor grado, actúan de forma combinada, por lo tanto, al momento de proponer una estrategia de ventilación natural, se debe encontrar la proporción idónea, que se ajuste a la condición del proyecto y situación climática. A lo cual, se suma lo planteado por Cheng et al. 2018 que antes de aplicar una estrategia, se debe tener en consideración las cualidades del aire exterior e interior, los requisitos de confort térmico de los ocupantes, así como los potenciales ahorros de energía, advirtiendo que antes de invertir en un estudio de ingeniería detallado se deben tomar decisiones conceptuales en la etapa inicial de diseño del edificio.

Ventilación cruzada

La ventilación cruzada como estrategia para el mejoramiento de las condiciones del ambiente interior, requiere contar con aberturas en las caras opuestas del volumen, para aprovechar el diferencial de presiones generado por la acción del viento. Esto se produce dado que, la incidencia del viento en la cara de un edificio producirá una presión positiva en el lado de barlovento y una presión negativa relativa en el lado de sotavento, ésta diferencia de presión, así como las que ocurren dentro del edificio, impulsará el flujo de aire (Khan et al.,2008).

La ventilación cruzada se presenta como una estrategia eficiente en la medida que se produzca la circulación fluida del aire a través de las aberturas internas de la edificación, es decir, debe poder ser atravesada por el flujo de aire, sin interrupciones entre su entrada y salida. Por tanto, factores como la

ubicación de ventanas, las dimensiones de sus áreas abatibles, tipo de aberturas así como también los vanos en muros interiores y dispositivos previstos para la ventilación natural como rejillas, aireadores y dispositivos de pasada, se tornan de gran importancia para el funcionamiento de esta estrategia.

Entre otro de los factores que influye en el desempeño de la ventilación cruzada, figura la orientación de las ventanas a los vientos predominantes en las épocas cálidas, ya que, si el circuito previsto para el flujo de aire está a favor de los vientos, el desempeño será mayor que si éste se encuentra perpendicular al flujo. Por otra parte, también interviene en el rendimiento el grado de exposición que tengan las aberturas externas al viento, dado que, si estas cuentan con alguna obstrucción como árboles u otras edificaciones, el flujo estará en riesgo de ser disminuido. Por último, es necesario considerar que el viento no posee un comportamiento uniforme y una dirección fija, debiéndosele asignar un margen de fluctuación para conocer con precisión el aporte de la ventilación cruzada Ji et al. (2010).

Ventilación por efecto stack

Esta estrategia denominada también como efecto “chimenea”, se basa en el fenómeno de flotabilidad generado por la diferencia de densidad del aire; donde el aire más frío y denso tiende a bajar, desplazando hacia arriba al aire caliente que es menos denso y más liviano. Por tanto, valiéndose de este principio, al contar con aberturas a distintas alturas, es posible activar la circulación vertical, en acuerdo con el principio de conservación de masas, que plantea que el flujo de aire que entra a través de la abertura inferior es igual al flujo de aire que sale por las aberturas superiores.

Por otra parte, como la estrategia de ventilación por stack busca aprovechar el mecanismo de tiro térmico, para que esto sea efectivo, se debe contar con diferenciales de temperatura entre el ambiente interior y exterior, sumado a una altura del ducto o espacio vertical que conecte la entrada inferior del flujo de aire y la salida superior de este.

Ventilación lateral por una abertura

También conocida como ventilación unilateral, se genera cuando la circulación de aire es a través de aberturas ubicadas al mismo lado de un entorno, lo cual la hace muy recurrente, ya que está presente en tipologías edificios de aulas, oficinas y departamentos residenciales. En lo que refiere a la ruta de flujo generada por la ventilación de un solo lado, ésta es impulsada por dos efectos principales: el efecto de flotabilidad y el efecto del viento; sin embargo, los resultados de Caciolo et al. (2011) muestran que el viento genera turbulencia en la apertura, contrarrestando el efecto stack.

Si bien, Heiselberg y Perino (2010) plantean que la ventilación natural de un solo lado, impulsada por la flotabilidad ha demostrado ser efectiva y proporcionar altas tasas de cambio de aire para la temperatura y el control de la calidad del aire interior, de acuerdo a Caciolo et al. (2012) ésta se presenta menos eficiente en comparación con otras estrategias de ventilación natural.

Ventilación natural nocturna

La ventilación nocturna es una estrategia de enfriamiento pasivo que puede ser de gran aporte a las demandas energéticas en épocas cálidas, así como en la mejora del confort térmico de los ocupantes tanto de día como de noche. Su principio consiste en permitir el ingreso de aire fresco durante la noche, con objeto de liberar las ganancias de calor adquiridas por el edificio en el transcurso del día. De esta manera el aire fresco que ingresa, no solo impacta de forma directa en la temperatura del aire del recinto, sino que también enfría los materiales que constituyen la edificación al tener contacto con su masa térmica, adquiriendo de este modo la capacidad de absorber calor en las horas venideras.

La eficiencia de la ventilación nocturna depende de las condiciones climáticas, especialmente de las temperaturas externas, las cuales deben ser más bajas por la noche, que las temperaturas de confort experimentadas durante el día; condición que funciona muy bien en climas con mayor oscilación térmica. Por otro lado, la masa térmica juega un rol fundamental debido a que entre más alta sea la capacidad de absorber y almacenar calor de los materiales, mayor será la amortización de la temperatura y el desfase en la respuesta al ambiente. A este último principio, se suma la conveniencia de que la masa térmica quede expuesta al flujo de aire, con la finalidad de que exista mayor superficie de intercambio.

El fenómeno anterior ha sido seguido por numerosos estudios, los que particularmente se han concentrado en edificios de oficinas. En los que, a partir del potencial de almacenar calor, producto del aporte de la ventilación nocturna, se genera una reducción de las cargas de refrigeración diurnas. Solgi et al. (2018) plantea que la contribución de la ventilación nocturna a las cargas de refrigeración varía entre 10% y 40%, con un promedio de 26%, dependiendo de la masa térmica y de los diferenciales térmicos diarios.

Por otra parte, no solo es apreciable el impacto de la ventilación nocturna en edificios de uso diurno, como oficinas o edificaciones comerciales, sino que también en edificios residenciales se puede observar el impacto en las temperaturas operativas las 24 h. Así lo demuestra Exizidou et al. (2017), quien registró

una reducción promedio de éstas temperaturas de 2,7°C a lo largo del día, para una vivienda tradicional en la cual se aplicó ventilación nocturna. Quedando en evidencia el beneficio de esta estrategia para sus ocupantes, lo que puede ser de gran valor para el confort térmico en situaciones calurosas.

2.2 Sobrecalentamiento y confort térmico en viviendas

2.2.1 Cambio climático y su efecto en el sobrecalentamiento de las ciudades

El calentamiento global en la actualidad se presenta como un desafío a gran escala no solo porque afecta directa o indirectamente a todos los habitantes del planeta, sino porque es causado principalmente por la actividad humana según lo establecido por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2014). Entre sus consecuencias directas está el aumento de las temperaturas globales promedio, razón por la que la atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido y elevando el nivel del mar, según lo señalado por el IPCC. Por otra parte, se advierten cambios en los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, como por ejemplo la disminución de las temperaturas frías extremas, a cambio del aumento de las temperaturas cálidas extremas. En esta línea Meehl y Tebaldi (2004) examinaron el futuro comportamiento de las olas de calor para diferentes escenarios climáticos, prediciendo que estas se intensificarán en las zonas en que ya se experimentan y al mismo tiempo aumentaran en áreas ajenas hasta ahora a estos sucesos climáticos, lo cual presenta mayor gravedad dada su poca adaptación a las altas temperaturas.

Por otro lado, Murphy et al. (2009) plantea que sumado al hecho de que los asentamientos humanos son altamente sensibles al calentamiento global, se debe considerar que las mismas áreas urbanizadas ejercen influencias significativas en los climas locales, a través del efecto isla de calor. Dicho fenómeno, se define como el aumento sistemático de la temperatura del aire en entornos urbanos en comparación con las áreas rurales adyacentes. Lo cual es causado por: la importante liberación de calor antropogénico; el almacenamiento excesivo de radiación solar en las estructuras de la ciudad; falta de espacios verdes y sumideros fríos; la falta de circulación de aire en las zonas urbanas; el efecto invernadero urbano, producido por mayor radiación entrante de onda larga proveniente de la atmósfera urbana contaminada y más cálida; la evapotranspiración limitada, generada por la reducción de superficies con capacidad de contención de humedad y posteriormente evaporación Oke et al. (1987).

En lo que respecta a las consecuencias del aumento de las temperaturas urbanas, estas afectan el confort térmico, llegando incluso a comprometer la salud de la población más vulnerable y al mismo tiempo exacerban las demandas de energía para fines de enfriamiento. Santamouris M. (2014) establece que la carga de enfriamiento de los edificios urbanos típicos es un 13% más alta en comparación con edificios similares en áreas rurales. Esto último, cierra un círculo vicioso puesto que gran parte de la energía utilizada para acondicionar el parque edificatorio de las ciudades, aporta al calentamiento global, ya sea en sus procesos de producción, distribución o transformación para el funcionamiento de los equipos de ventilación y refrigeración.

2.2.2 El fenómeno de sobrecalentamiento en edificaciones

En la actualidad el sobrecalentamiento de los edificios es reconocido como uno de los problemas emergentes del cambio climático de impacto directo a la población, ya que implica que los edificios no logran proporcionar un refugio adecuado a las altas temperaturas (Nicol et al. 2012). Por otra parte, Lomas y Porritt (2017) advierten, una mayor incidencia del fenómeno de sobrecalentamiento en edificios situados en climas templados, dado que su foco se centra en la conservación del calor del invierno y no el acondicionamiento en las estaciones cálidas. En una línea similar, Palme et al. (2017) tras realizar evaluaciones de riesgo de sobrecalentamiento de viviendas en distintos puntos de Sudamérica, señala que debido a la necesidad de controlar el calor, se puede generar un aumento masivo en el uso de sistemas de aire acondicionado, incluso donde este tipo de electrodomésticos han estado ausentes por razones culturales y climáticas, proponiendo a cambio soluciones para la evacuación del calor a partir del potencial natural entregado por la ventilación cruzada.

Respecto a la existencia de sobrecalentamiento en edificios, la Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE) a través del Memorando Técnico "TM52" (CIBSE, 2013) plantea que existe sobrecalentamiento cuando los ocupantes se sienten incómodos debido a que la temperatura ambiente interior es demasiado alta. Esto último se establece conceptualmente frente a criterios más rígidos como los establecidos por (CIBSE, 2006) que recomendaba limitar la ocurrencia esperada de temperaturas operativas por encima de 28 °C al 1% del período anual ocupado. Esto último, según Nicol et al. (2011) es discutible tras la introducción del enfoque adaptativo respecto al confort térmico; ya que éste, establece que la temperatura a la que la mayoría de las personas se siente cómoda varía con la media de la

temperatura externa. Además, los mismos autores, señalan que si bien CIBSE (2006) proporciona una medida de la ocurrencia de sobrecalentamiento, no entrega una medida de su gravedad.

Por tanto, TM52 define un método basado en el modelo de confort adaptativo para evaluar el riesgo de sobrecalentamiento y el impacto en los ocupantes, a partir de tres criterios, debiendo pasar al menos dos de los tres criterios: el primero establece un límite para el número de horas que la temperatura operativa puede superar el umbral de temperatura de confort (límite superior del rango de temperatura de confort) en 1 K o más durante las horas ocupadas durante los cinco meses más cálidos del año; el segundo criterio se ocupa de la gravedad del sobrecalentamiento en un día cualquiera, cuyo nivel es una función tanto del aumento de la temperatura como de su duración, estableciendo un límite diario de aceptabilidad; el tercer criterio define una temperatura máxima absoluta aceptable para una habitación (CIBSE, 2013). Si bien este método proporciona una orientación a los diseñadores para identificar sobrecalentamiento, también presenta algunas limitaciones, como el hecho de que esta norma esté concebida para el hemisferio norte, particularmente con bases de datos de edificaciones europeas, lo cual implica contextualizar parámetros en caso de aplicarlo en otras latitudes. Otro aspecto relevante a considerar según Brotas y Nicol (2017), es el método para contabilizar las horas de ocupación, particularmente en edificios residenciales, los cuales suelen estar desocupados durante las horas diurnas, durante los días de la semana, por lo que adoptar un perfil predominantemente nocturno más los fines de semana puede reducir significativamente el riesgo de fallar a los criterios de sobrecalentamiento. Por lo cual se concluye que aún no hay consenso respecto a un método para diagnosticar sobrecalentamiento, lo cual requiere mayor desarrollo en su contextualización a los tipos de ocupación, así como a las variables sociales y psicológicas que están detrás de la incomodidad de un ambiente.

2.2.3 Factores que influyen en el sobrecalentamiento de edificaciones

Si bien el fenómeno de sobrecalentamiento en edificios está vinculado al comportamiento de las ganancias internas y externas, existen factores que pueden influenciar en la respuesta que el edificio puede dar al ambiente interior, entre los que se considera: el tamaño y orientación de ventanas respecto a las ganancias solares, estrategias de ventilación, nivel de masa térmica de los materiales de construcción y el uso de materiales de baja reflectancia solar.

Respecto al tamaño y orientación de las ventanas, se debe considerar que, al aumentar las superficies vidriadas, se acrecienta el riesgo de sobrecalentamiento; lo mismo ocurre al orientarlas en las posiciones que implican mayor asoleamiento. En consideración a lo anterior, Bustamante et al. (2010), analizaron edificios de oficinas en Santiago de Chile, comparando entre las configuraciones de muro cortina completamente vidriado y con fachada mixta entre opaca y vidriada; resultando el primero con alto índice de sobrecalentamiento y alta demanda de refrigeración en comparación con el edificio de fachada mixta. Por otra parte, CIBSE AM10 plantea como las ventanas pueden ser concebidas en función del control solar, tomando en cuenta tanto la orientación del edificio como del contexto próximo, con el fin de aprovechar las sombras de elementos circundantes y la que el mismo edificio pueda ocasionar. Si estas medidas son insuficientes para manejar las ganancias solares de las superficies vidriadas, se puede recurrir a: parasoles o persianas externas, láminas o filtros espectrales en cristales, aleros y salientes en torno a las ventanas.

En el caso particular de las protecciones a la radiación solar en aberturas y fachadas Lomas y Porritt (2017) plantean que, en ciudades de climas templados como el norte de Europa y América, no existe una cultura de diseño y operación de edificios para hacer frente al calor del verano, lo cual es una barrera para los dispositivos de sombra externos como persianas y toldos, ya que no se conciben estos elementos como parte del diseño inicial de los proyectos; por cuanto existe suspicacia a los cambios estéticos que implica su instalación.

Respecto a la ventilación como estrategia para evitar el sobrecalentamiento, esta puede darse de manera mecánica, natural o mixta. Cobrando valor la opción de utilizar la ventilación natural por la mayor cantidad de tiempo posible, con el objetivo de no contribuir al calentamiento global y al empobrecimiento energético. Oropeza-Perez y Østergaard (2014), en su análisis de factibilidad del uso de ventilación natural para enfriar una vivienda aquejada de sobrecalentamiento en un clima templado, no solo comprobaron el aporte de la ventilación natural, sino que también demostraron una reducción del 90% de las horas de posible uso de ventilación mecánica. En esta misma línea Palme et al. (2016) en su estimación del riesgo de sobrecalentamiento y del potencial de refrigeración por ventilación natural de viviendas unifamiliares en ciudades costeras de Chile, concluye que en ante la presencia de riesgo de sobrecalentamiento, puede ser notablemente disminuido utilizando la ventilación natural trasversal dirigida por viento. Asimismo, Pomfret y Hashemi (2017) a partir de la evaluación a una vivienda como caso de estudio en Reino Unido, establecieron el valor de la ventilación nocturna como mejora al confort

térmico y que, al trabajar en conjunto con el aumento de la masa térmica de los muros, se reduce significativamente el riesgo de sobrecalentamiento.

En lo que concierne al aporte de la masa térmica, esta absorbe las ganancias internas de calor moderando las temperaturas interiores. En su análisis de sobrecalentamiento en edificaciones, Lomas y Porritt, (2017), advierten el uso de materiales livianos y rápidos de montar en la construcción de viviendas, los que carecen de la masa térmica necesaria para mejorar los grandes cambios de temperatura causados por las ganancias internas y solares del verano. A lo anterior, se suma el fenómeno que en climas templados los edificios dirigen sus esfuerzos para controlar las temperaturas interiores en invierno, lo cual puede conducir a edificios livianos y altamente aislados que responden mal en climas cálidos e incluso en climas relativamente fríos (Brotas y Nicol 2015). Coincidiendo con Pérez et al. (2018), quienes, en su análisis de mejora de la envolvente térmica de viviendas en la ciudad de Concepción, Chile, señalan que el aumento del aislamiento térmico en los edificios no siempre logra el resultado esperado, ya que, en algunos casos, el aislamiento térmico excesivo causa problemas de sobrecalentamiento en los periodos cálidos.

Otro factor mencionado al inicio de este apartado, es la capacidad de absorción de calor de los materiales que conforman las superficies exteriores, particularmente la cubierta, lo cual se transforma en preocupación, ya que de acuerdo a Akbari et al. (2008) normalmente los techos y pavimentos constituyen más del 60% de las superficies urbanas, donde las cubiertas representan del 20% al 25%, mientras que los pavimentos constituyen alrededor del 40%. De esta manera, si se consideran revestimientos apropiados sobre las superficies del entorno edificatorio y urbano, no solo se puede contribuir a la mitigación del efecto isla de calor, sino que también se puede mejorar la comodidad del edificio y reducir el uso de energía en refrigeración (Synnefa et al., 2006).

En referencia directa al material de la cubierta, este tema ha sido instaurado hace décadas, debido al impacto en el uso de energía en refrigeración, que ejerce el rendimiento térmico de techos y áticos. Parker et al. (2002) plantearon que los techos residenciales son calentados por la radiación solar durante las horas del día causando altas temperaturas al interior del aire del ático, lo cual es potenciado por la baja reflectancia solar de los materiales que la conforma; llegando a establecer que, en relación con un techo de tejas de asfalto negro, un techo de tejas blancas produce una reducción del 76% en el flujo de calor del techo en verano. Hahn et al. (2006) en su estudio de rendimiento térmico en viviendas al sur de Estados Unidos, advierten el amplio uso de la teja asfáltica como solución de cubierta, planteando que al

mejorar la reflectancia solar de estas, es posible obtener un impacto significativo en la disminución de energía eléctrica utilizada para el enfriamiento residencial. En la misma línea Rosado et al. (2014) comparó el desempeño térmico de una vivienda con tejas reflectantes y una con tejas de asfalto negra, obteniendo en el primer caso un ahorro de energía de enfriamiento anual de 26% y de 37% en horarios peak para la ciudad de Fresno en California, la cual cuenta con un clima semiárido, donde los equipos de aire acondicionado se utilizan generalmente de mayo a octubre.

Por otra parte, Santamouris et al. (2011), concluyeron su análisis de los materiales frescos para cubiertas, es decir, materiales con alta reflectancia solar y emisión de infrarrojos, los cuales no solo aportan en la disminución de las cargas de refrigeración de los edificios, sino que también contribuyen en gran medida a la reducción de las ganancias térmicas por convección y radiación en el entorno urbano y la mitigación del fenómeno de la isla de calor. En otro estudio Santamouris M. (2014) establece que al incorporar techos fríos o de mayor reflectancia, la tasa de depresión esperada de la temperatura ambiente urbana promedio varió entre 0,1 y 0,33 K.

Finalmente, al centrarse en el comportamiento de las temperaturas interiores de los recintos próximos a la cubierta, Mavrogianni et al. (2012), tras su análisis de sobrecalentamiento de viviendas en Londres, plantea que en edificaciones que toman altura, existe mayor riesgo de exposición a altas temperaturas en los pisos superiores, respecto a los pisos inferiores, lo cual es atribuible a que es posible que los pisos superiores ofrezcan menor protección contra el calor durante un período cálido. En una línea similar, Nicol y Humphreys (2018) advierten que en el caso de las viviendas los dormitorios se encuentran a menudo en la parte superior, donde las ventanas generalmente se mantendrán cerradas durante el día en ausencia de sus moradores, por lo que es muy probable que cuando estos regresen, encuentren los recintos superiores calientes en verano, lo cual puede provocar problemas de confort en las horas de sueño. Además, en el caso de viviendas de más de un piso, se produce una concentración de aire caliente en los pisos superiores en horas de la noche, producto de la liberación del calor acumulado durante el día por los muros de los primeros pisos, los cuales generalmente cuentan con mayor masa térmica.

2.2.4 Métodos para la estimación de confort térmico

La condición de confort o comodidad respecto al ambiente por parte de sus ocupantes, no solo confirma el estándar de habitabilidad necesario para el desarrollo de las actividades humanas en un recinto

determinado, sino que cubre las expectativas de bienestar fisiológico y psicológico para una permanencia plena. El confort del ambiente es determinado por un conjunto de condiciones térmicas, visuales, acústicas y de calidad del aire. Sin embargo, el confort térmico es tratado de manera individualizada, debido a su naturaleza multifactorial, la cual incluye variables objetivas y subjetivas. Si bien es complejo establecer un estándar único de aceptación, si es posible manejar parámetros que conformen a una mayoría de los ocupantes. Esto a partir de metodologías que establecen la valoración de ambientes a través de la integración de factores ambientales y personales. Dichos métodos o estándares cobran relevancia a la hora de diseñar o evaluar un entorno construido.

El confort térmico, es definido según ASHRAE 55 (2017) como una condición mental que expresa satisfacción con el entorno térmico y se valora por medio de una evaluación subjetiva, enfocada en el intercambio térmico entre las personas y su ambiente, definiéndose seis parámetros esenciales de medición los cuales depende el confort térmico. Cuatro de ellos están vinculados al ambiente propiamente tal: temperatura del aire, temperatura media radiante, velocidad del aire y humedad relativa, mientras que los otros dos están relacionados con factores fisiológicos de los usuarios, como es la tasa metabólica y la vestimenta.

Para efectos de abordar el confort térmico en espacios interiores se han desarrollado dos enfoques, los cuales son el fruto de los hallazgos de una serie de investigaciones realizadas en las últimas décadas. El primero de ellos es el elaborado por Fanger (1970), que establece un modelo de estado estacionario, originalmente dirigido a espacios climatizados con aire acondicionado. Mientras que en otra línea se sitúa el modelo adaptativo, basado en el principio de adaptación realizado por las personas frente a su entorno. Este último enfoque, es impulsado por investigaciones de diversos autores (Nicol y Humphreys, 1973; Auliciems, 1981; De Dear y Brager, 1998; Nicol y Humphreys, 2002; De Dear y Brager, 2002), siendo tema en constante evolución en la actualidad.

Cabe señalar que la evolución de ambos enfoques se ha transformado en las bases teóricas y empíricas de los estándares internacionales que cubren la temática del confort térmico como es la ISO 7730 -2005, EN 15251 - 2007 y ASHRAE - 2017, siendo estas últimas dos las que incorporan el modelo adaptativo.

2.2.4.1 Método de Fanger a partir de la estimación del PMV/PPD

El modelo de Fanger (1970), se basa en la teoría de la transferencia de calor en estado estable, buscando predecir la sensación térmica media de un grupo de personas, la cual será expresada a través de los

índices de voto medio predicho (PMV) y el porcentaje predicho de insatisfechos (PPD) resultante para ese entorno térmico. Encontrando de esta manera, el estado de confort para los ocupantes o también llamada "neutralidad", una vez que se consigue el equilibrio térmico entre el cuerpo y el entorno. Siendo este último punto motivo de cuestionamiento, ya que la definición de un ambiente térmico neutral como ideal, se basa en un enfoque muy determinista, que no incorpora aspectos psicológicos y culturales del confort, según lo plantea Ferrari y Zanotto (2012). A lo anterior, se suma el rol de receptor pasivo, por parte de los usuarios, de las condiciones ambientales debido a que en la práctica muchas personas al experimentar cambios térmicos en su entorno, toman medidas que modifican dichas condiciones. Adaptando incluso su umbral de aceptación a medida que tiene control de su entorno.

El voto medio previsto (PMV) ha sido probablemente el índice de confort térmico más utilizado para evaluar ambientes interiores, particularmente en edificios con sistemas de HVAC, transformándose en la base de la Norma Internacional ISO 7730 (2005) y punto de debate y a la vez partida para investigaciones en este campo. El propio Fanger junto a Toftum (2002) en épocas más recientes, introdujeron una extensión del modelo de PMV que incluye un factor de expectativa para su uso en edificios sin aire acondicionado para climas cálidos, realizando de esta manera importantes avances en la explicación de por qué el PMV sobrestima la sensación térmica de los ocupantes en edificios sin aire acondicionado, además de confirmar su eficacia en edificios con sistemas HVAC. Por otro lado, De Dear y Brager (1998) coinciden con el estudio antes mencionado y ponen en valor el contexto de aplicación en que fue concebido el modelo. Sin embargo, los mismos autores plantean que el modelo PMV/PPD no es aplicable a locales con ventilación natural, ya que el modelo se desarrolló en condiciones de laboratorio controladas, donde las personas no tenían control sobre su entorno. En una línea más crítica Humphreys y Nicol (2002) plantearon que el PMV a menudo difiere marcada y sistemáticamente del voto medio real, tanto para espacios con ventilación natural (NV) como para espacios con aire acondicionado (AC). Lo cual no solo resta precisión al método en particular, sino que pone en alerta la precisión de la misma ISO 7730.

2.2.4.2 Método adaptativo de confort

Por mucho tiempo existió una tendencia a establecer parámetros óptimos de confort térmico, a partir de la elección de temperaturas estáticas de diseño interior, con el fin de calibrar equipos de climatización mecánica en ambientes controlados centralmente, en donde los ocupantes no poseen control de su entorno térmico. Sin embargo, dichos parámetros no siempre cumplen las expectativas de la mayoría de

los usuarios, generando exceso de frío en verano y sobrecalentamiento en invierno por parte de los equipos de climatización. Por lo mismo De Dear y Brager (1998) dejan en claro que los climas interiores que se encuentran en el HVAC, controlados centralmente y en los edificios con ventilación natural, no solo son cuantitativamente diferentes, sino que también cualitativamente distintos y como tales, requieren estándares de confort separados.

Por su parte el desarrollo del modelo adaptativo se remonta a la década del setenta con Nicol y Humphreys (1973), quienes planteaban la hipótesis del confort térmico como parte de un sistema de autorregulación, al observar como las personas reaccionan positivamente a su entorno térmico a medida que realizan modificaciones en el lugar. Para finales de la década del 70 Humphreys (1978) establece por primera vez una relación de adaptación entre clima y comodidad. Postulando que, a partir de los datos disponibles de las temperaturas exteriores en una localidad determinada, es posible, pronosticar el rango de las temperaturas que los ocupantes necesitarán en interiores para sentirse cómodos. Auliciems (1981) abre el debate respecto a la insuficiencia de los modelos fisiológicos frente al fenómeno de la percepción térmica, apelando a un enfoque más holístico que incluya dentro de sus parámetros, factores culturales, experiencias y expectativas climáticas. De esta manera, la teoría de un modelo adaptativo fue tomando cuerpo a través de la contribución sistemática de investigadores, llegando a incorporar este modelo en estándares internacionales de confort térmico, como el estándar ASHRAE 55 o la norma EN15251

El modelo adaptativo definido por ASHRAE 55 - 2017 opera relacionando las temperaturas de diseño interior (rangos de temperatura aceptables) con los parámetros meteorológicos o climatológicos exteriores, rompiendo el paradigma establecido por los modelos de confort térmico, como el PMV de Fanger. Esto se debe a que este último método utiliza las variables del entorno interior que rodean de directamente al ocupante del edificio, como dato de entrada para los parámetros ambientales del análisis, es decir, da cuenta del confort térmico en función del microclima que se produce en el edificio a partir del intercambio de energía o balance térmico con el sujeto. Mientras que el modelo adaptativo predice la comodidad a partir de factores contextuales más amplios, como la incorporación de la variable ambiental externa.

Por otro lado, la teoría del modelo adaptativo se basa en la hipótesis de que si se genera un cambio en el entorno interior que produce malestar, las personas reaccionan para restablecer su confort (Nicol et al., 2012). Lo anterior es reforzado por Humphreys et al. (2013) agregando que el modelo adaptativo es un

enfoque de confort térmico, que no comienza con la teoría del intercambio de calor, sino con la adaptación del comportamiento que las personas hacen para mantenerse cómodas. Las cuales se adaptan a su entorno térmico haciendo cambios en el aislamiento de la ropa, postura o actividad. Incluso si es necesario adaptan el entorno térmico a sus demandas, a través de acciones como abrir ventanas, ajustar persianas, calefacción y refrigeración. Por tales procesos las personas están en equilibrio dinámico con su entorno.

- ASHRAE 55

La ASHRAE (American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers) es una asociación internacional proveniente de EE. UU. país líder en el mercado del acondicionamiento mecánico. Por lo mismo, ASHRAE 55 es base de la normalización para edificios acondicionados mecánicamente, fundamentándose en el PMV como método de manera similar a la ISO 7730. Sin embargo, en paralelo ha estado en sintonía con las investigaciones desarrolladas en el campo de modelos de confort adaptativo, considerando en esta línea los avances logrado por De Dear y Brager (1998), quienes levantaron en el año 1998 una base de datos enmarcada en el proyecto ASHRAE RP-884, la cual contó con 21.000 observaciones de sensación térmica en estudios de campo para 160 edificios en 9 países. Esto permitió proponer un estándar de confort térmico de temperatura variable para complementar la Norma 55, aplicable para edificios con sistemas de aire acondicionado centralmente controlados, como para edificios con ventilación natural. De este modo se logró dar respaldo al modelo adaptativo, permitiendo su incorporación en el estándar ASHRAE 55 en el año 2004, como método opcional para edificios con ventilación natural. Posteriormente, se incluyó con fuerza normativa en su versión del año 2010 y 2013, siguiendo en constante perfeccionamiento hasta la actual versión 2017.

Como se planteaba anteriormente, el estándar adaptativo utiliza la relación entre la temperatura de confort interior y las temperaturas exteriores. Definiendo un rango de aceptabilidad por parte de los ocupantes, basado en la siguiente ecuación:

$$T_{\text{comf}} = 0,31 T_{\text{pma(out)}} + 17,8 \quad \text{Ec. (2.1)}$$

Donde T_{comf} es la temperatura óptima para la comodidad y $T_{\text{pma(out)}}$ es la temperatura media del aire exterior prevaleciente. Por otro lado, el rango establecido por esta última ecuación se complementa con una temperatura límite tanto superior como inferior, estableciendo una banda de aceptación para el 80% o el 90% de los ocupantes satisfechos, según la ecuación:

$$T_{\text{accept}} = 0,31 T_{\text{pma(out)}} + 17,8 \pm T_{\text{lim}} \quad \text{Ec. (2.2)}$$

Donde T_{accept} indica la zona de temperaturas aceptables para la comodidad y T_{lim} es corresponde al límite tanto inferior como superior que define la banda de aceptabilidad. Siendo 3.5 K la T_{lim} para definir la banda de un 80% de aceptabilidad, mientras que 2.5 K para el 90%. Finalmente, los rangos de temperatura operativa aceptables para espacios naturalmente acondicionados quedan graficados por la (figura 2.1) contenida en ASHRAE 55 (2017).

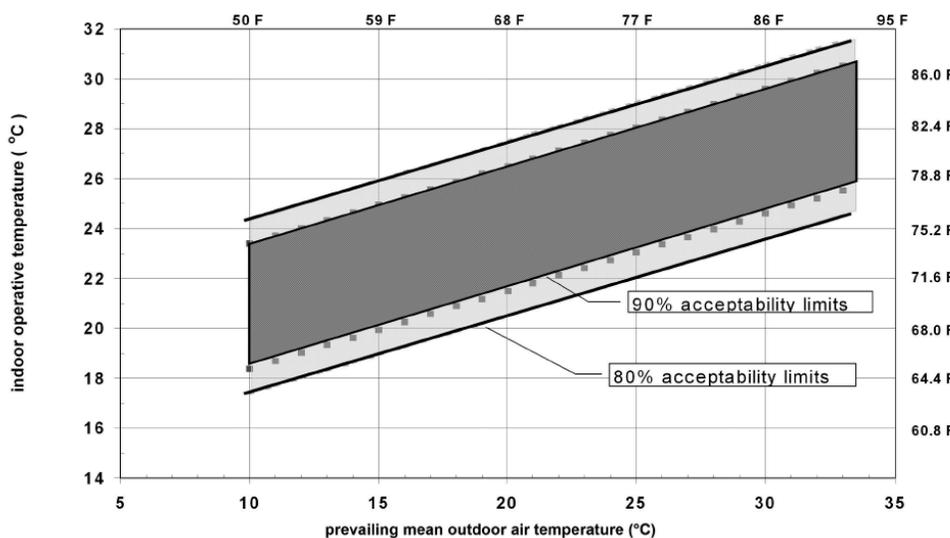


Figura 2.1: Temperatura operativa aceptable a rangos para espacios naturalmente acondicionados. (Fuente: ASHRAE 55 - 2017)

European standard EN 15251

El estándar EN 15251, desarrollado por el Comité Europeo de Normalización (CEN) y apoyado por los trabajos de diversos autores (Humphreys y Nicol, 1998; Mc Cartney y Nicol, 2002; De Dear, 2004), en términos generales es similar a la norma ASHRAE, ya que utiliza el PMV para edificios enfriados mecánicamente y a la vez posee una norma adaptativa para evaluar edificios en el modo de funcionamiento libre. Por otro lado, así como el modelo adaptativo de ASHRAE 55 se apoyó en los datos de la base RP-884, el estándar EN 15251 utilizó los datos del proyecto SCAT (Smart Controls and Thermal Comfort) para establecer los límites de temperatura en edificios con ventilación natural. Dicha base de información fue recopilada en cinco países europeos, por lo tanto, EN 15251 es un estándar más directamente aplicable a Europa (Nicol & Humphreys, 2010).

Respecto al estándar de confort la norma EN 15251, establece para edificios con ventilación natural, que la temperatura de confort (T_{comf}) se define en acuerdo con la temperatura promedio de funcionamiento externo mediante la ecuación 2.3.

$$T_{comf} = 0,33 T_{rm} + 18,8 \quad \text{Ec. (2.3)}$$

Donde (T_{rm}) se define como el promedio de funcionamiento ponderado exponencialmente de la temperatura exterior diaria.

Por otra parte, EN 15251 plantea categorías de acuerdo al tipo de edificio y las expectativas de los ocupantes (figura 2.2), dichas categorías generarán distintos límites que definen el rango de confort al aplicar la ecuación temperatura de confort (figura 2.3).

Categoría	Explicación
I	Alto nivel de expectativa, recomendado para espacios ocupados por personas débiles y sensibles con requisitos especiales, como disminuidos, enfermos, niños muy pequeños y ancianos
II	Nivel normal de expectativa; debería utilizarse para edificios nuevos y renovados
III	Aceptable y moderado nivel de expectativa; puede utilizarse en edificios ya existentes
IV	Valores fuera de los criterios de las categorías anteriores. Esta categoría sólo debería aceptarse durante una parte limitada del año

Figura 2.2: Descripción de aplicabilidad de las categorías, de acuerdo al tipo de edificio y las expectativas de los ocupantes (fuente: EN 15251 - 2007).

Categoría I	límite superior	$T_{comf} = 0,33 T_{rm} + 18,8 + 2$
	límite inferior	$T_{comf} = 0,33 T_{rm} + 18,8 - 2$
Categoría II	límite superior	$T_{comf} = 0,31 T_{rm} + 18,8 + 3$
	límite inferior	$T_{comf} = 0,33 T_{rm} + 18,8 - 3$
Categoría III	límite superior	$T_{comf} = 0,33 T_{rm} + 18,8 - 4$
	límite inferior	$T_{comf} = 0,33 T_{rm} + 18,8 - 4$

Figura 2.3: Descripción de aplicabilidad de las categorías, de acuerdo al tipo de edificio y las expectativas de los ocupantes (fuente: EN 15251 - 2007).

2.2.5 Confort nocturno

En general el confort térmico nocturno aún está siendo explorado, según lo planteado en CIBSE TM52 (2013). Esto obedece a que el grueso de los estudios de confort térmico se concentra en edificios de oficina o de alta demanda en horario diurno, quedando en segundo plano los edificios residenciales. A pesar de que estos últimos concentran el mayor porcentaje de ocupación al caer el día y a lo largo de la noche, debido al cese de las jornadas laborales y escolares, llevándose los dormitorios el mayor porcentaje de uso, debido a las horas de sueño.

En nuestra actividad diaria, dormimos aproximadamente un tercio de las horas totales del día. El sueño por su parte es esencial para que el cuerpo se recupere de la fatiga física y psicológica sufrida a lo largo del día, constituyéndose en un refresco para la mente y la restauración de energía para el mantenimiento de las funciones corporales (Lan y Lian, 2016). Si se toma en cuenta que el cuerpo humano es sensible a la temperatura del aire durante el sueño, evidentemente las condiciones de confort de la habitación deben ser las adecuadas. Para esto se debe tener en consideración lo planteado por Lan et al. (2017) quienes indican que las personas al dormir tienen requisitos diferentes respecto al confort térmico que las personas despiertas, por lo que asumir de manera directa las teorías de confortabilidad de las personas despiertas, podría malinterpretar la respuesta térmica de las personas que duermen.

En la actualidad, no existe un estándar normado o una temperatura neutra térmica acordada, debido a que aún se requiere levantar mayor cantidad de conocimiento para llegar a consensos. La complejidad de este tema radica principalmente en la naturaleza multifactorial del fenómeno, ya que se debe considerar la correlación entre el sistema de regulación térmica y la del sueño de las personas con las condiciones del ambiente. A lo cual se suma la consideración de las diferencias en los climas locales, el uso de sistemas de camas y hábitos de dormir de las distintas culturas.

A modo de descripción general el sueño consta de dos estados REM (siglas en inglés del movimiento rápido de ojos) y NREM (estado de no REM), las cuales se alternan cíclicamente. El sueño comienza en NREM, el cual está subdividido en tres etapas (N1, N2 y N3) las cuales se van desarrollando de manera progresiva hasta pasar al estado de REM. Previo a este último estado, precisamente en la etapa N3 se generan ondas cerebrales de baja frecuencia, denominadas SWS (sueño de ondas lentas) correspondiente a la fase del sueño más profundo. En referencia a esto último Okamoto-Mizuno y Mizuno (2014), generaron hallazgos que indican que la exposición al calor afecta la fase SWS y al estado

de REM, concluyendo finalmente, que la alteración del sueño durante la exposición al calor, puede conducir a procesos de termorregulación en los seres humanos, lo cual puede incluir tomar acciones en estado de vigilia para disminuir la temperatura ambiente. En cambio, la exposición al frío afecta la respuesta cardíaca autónoma durante el sueño sin afectar las etapas del sueño y las sensaciones subjetivas, lo cual no activaría la termorregulación y por defecto la opción de controlar la temperatura ambiente, implicando con esto un mayor grado de impacto a la exposición al frío que al calor.

Por otra parte, es válido destacar que existe una diferencia entre la temperatura ambiental de la habitación y la que experimenta el cuerpo de quien duerme. Debido a que la ropa de cama actúa como material aislante, provocando un microclima diferente en su interior, desarrollado a partir de los mecanismos de termorregulación del propio cuerpo. En esta misma línea Song et al. (2016) investigaron la distribución de la temperatura del clima de la cama y la condición de confort térmico de diferentes partes del cuerpo. Concluyendo mediante mediciones fisiológicas y evaluaciones subjetivas, que la temperatura al interior del lecho estaba en el rango de 31.1 °C y 31.6 °C. Sin embargo, la temperatura percibida en la cara de los individuos podía llegar a ser de 11.3 °C, equivalente a la temperatura ambiente. Acercándose a lo planteado por Lan et al. (2017) que establece que, a pesar del amplio rango de temperatura neutra térmica en la habitación, la temperatura neutra térmica del microambiente de la cama durante toda la noche es constante alrededor de 30 °C. Este último dato coincide (Nicol y Humphreys, 2018) quienes concluyen en una temperatura aproximada a los 30 °C para el espacio inmediato alrededor de una persona dormida.

En lo que respecta a la temperatura térmica neutra de la habitación, existe diversidad de hallazgos por parte de los investigadores. Lan y Lian (2016) tras realizar una revisión al estado del conocimiento sobre medio ambiente térmico y calidad de sueño, determinaron como síntesis a informes de los estudios experimentales, que, para sujetos cubiertos con ropa de cama, estos seleccionaron temperaturas térmicas neutras de 20 °C a 26 °C, mientras que los sujetos sin cubrir, seleccionaron la temperatura térmica neutra de 29 °C. Por otra parte, Lan et al. (2014), evaluaron los efectos que tenía la temperatura del aire en la calidad del sueño de las personas, mediante cuestionarios subjetivos realizados antes y después del sueño, así como también el registro de las señales de electroencefalograma (EEG). De este modo, se generaron tres temperaturas de medición 23 °C, 26 °C y 30 °C. Finalmente, los sujetos reflejaron que la temperatura de confort térmico era mayor en el sueño en comparación con la del estado de vigilia, ya que en este estado declararon sentirse térmicamente neutros a 23 °C. Sin embargo, en estado de sueño la temperatura neutra aumentó al rango existente entre 23 °C y 26 °C, siendo esta

última la que reportó mayor comodidad en el sueño. Mientras que Pan et al. (2012) obtuvieron resultados de calidad del sueño a partir de mediciones subjetivas y objetivas, las cuales determinaron que la condición óptima de temperatura ambiente para conciliar y mantener el sueño profundo es 23 °C.

Finalmente, si bien no existe una temperatura consensuada, en base al avance de lo investigado, es posible establecer un rango de temperatura térmica para la habitación de entre 23 °C y 26 °C para sujetos cubiertos.

2.2.6 Factores que dificultan la ventilación natural en viviendas

Si bien la ventilación natural es una solución eficiente y de bajo impacto ambiental, muchas veces ésta no puede aplicarse con todo su potencial a pesar de contar con las condiciones de vientos y topografía necesarias. Entre las causas que limitan, se encuentran en primera instancia los factores asociados a la configuración urbana, así como los de las edificaciones mismas. Por otra parte, influyen barreras provenientes del comportamiento de los ocupantes, vinculadas principalmente a la abertura y cierre de ventanas.

Respecto a la influencia de la configuración urbana en los flujos de aire disponibles para efectos de ventilación natural, estos son directamente afectados por el nivel de rugosidad y los efectos térmicos que presentan las ciudades. En relación a la rugosidad de la superficie urbana, figuran los edificios como uno de los principales determinantes, puesto que, a diferencia de los elementos vegetativos son impermeables, inflexibles y generalmente de bordes afilados Oke et al. (2017). En torno a esto He et al. (2019) profundizan caracterizando las estructuras de la superficie urbana para los estudios sistemáticos del rendimiento de la ventilación local, generando tipologías basadas en variables como: compacidad, altura de la edificación y estructura de la calle, con objeto de instruir a los planificadores urbanos y a los diseñadores en la comparación del rendimiento de la ventilación urbana aplicada a diferentes morfologías edificatorias y configuraciones barriales.

Por otra parte, las diferencias de temperaturas originadas entre el microclima generado en la zona urbana “isla de calor” y las temperaturas del terreno circundante a ella, ocasionan diferenciales de presión que influirán en el comportamiento de los flujos de aire disponibles tanto para mejoramiento de la calidad de aire, como para efectos de enfriamiento.

Palme et al. (2017) en su estudio enfocado en la ventilación natural como estrategia de mitigación al sobrecalentamiento de edificios en ciudades costeras de Latinoamérica, plantea que es posible

garantizar la comodidad de las personas al interior de sus residencias, al contemplar el aumento de la velocidad del aire que se puede obtener con un buen diseño urbano; sin embargo, esto no siempre se considera en la planificación de las ciudades actuales. Dentro de las mejoras se debe considerar: la dimensión y orientación de ventanas, para maximizar la entrada de aire; evaluar la dimensión y orientación de los edificios, con objeto de aumentar la ventilación cruzada dentro del tejido urbano; restringir la altura de los edificios en las primeras líneas costeras, permitiendo con esto que las brisas provenientes del mar puedan ingresar al tejido urbano y aportar al enfriamiento.

Por otra parte, Brotas y Nicol (2017) advierten que la rápida urbanización de las ciudades, el aumento del valor del suelo y la escasez de espacio, se ha traducido en un paisaje urbano más compacto, denso y con menos espacios abiertos, dificultando el desarrollo de estrategias pasivas de enfriamiento. Lo anterior, puede traer como consecuencia la problemática planteada por Etheridge, (2012) referida al patrón de flujo que experimentan las viviendas densamente emplazadas, las cuales por su proximidad conforman una superficie rugosa sobre la cual el viento fluye con poco desplazamiento vertical, generando con esto que el flujo alrededor de las fachadas se torne altamente turbulento y por defecto disminuya el potencial de ventilación cruzada a través de aberturas en las fachadas (figura 2.4)

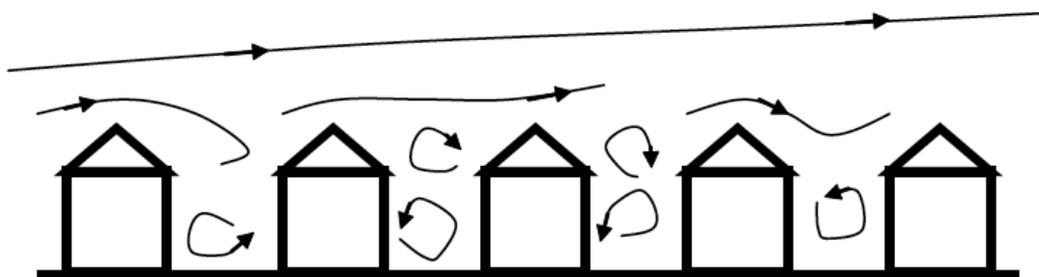


Figura 2.4: Patrón de flujo sobre viviendas densamente emplazadas (fuente: Etheridge D. 2012)

En lo que concierne a las edificaciones, Palme et al. (2016) al evaluar la capacidad de enfriamiento pasivo por ventilación natural de viviendas sociales en Chile, detectó una alta capacidad de evacuación de calor por ventilación natural, siempre y cuando las viviendas se encuentren bien orientadas y con una distribución interna que, en colaboración con la disposición de las ventanas, permita que el flujo de aire las atraviese. Otorgándole de este modo un rol fundamental a la ventana como componente del sistema de ventilación, ya que actúa como dispositivo de admisión, paso y extracción de aire. En esta línea Rijal et al. (2007) define a las ventanas como uno de los principales medios por los cuales los ocupantes del edificio controlan el ambiente interior a partir de las temperaturas exteriores, razón por la cual la

proporción de ventanas abiertas es más baja en invierno, media en primavera - otoño y más alta en verano.

De esta manera, las ventanas permiten llevar a cabo estrategias de ventilación natural tanto diurna como nocturna, sin embargo, la efectividad de esto, de acuerdo con Mavrogianni et al. (2014), depende de los patrones ocupación y comportamiento de los moradores, particularmente con la abertura de ventanas, las cuales por diversas razones podrían mantenerse cerradas. En referencia a esto, Lomas y Porritt (2017) plantean que si bien la ventilación nocturna, podría hacer mucho para aliviar el riesgo de sobrecalentamiento, se ve especialmente limitada por el ruido urbano, lo cual condiciona a los usuarios a mantener las ventanas cerradas durante la noche. Otro de los factores que dificulta el hábito de la ventilación en viviendas es el factor de seguridad, ya que existe el temor de intrusión en las horas de ausencia de los ocupantes o durante la noche, dificultando la ventilación nocturna (figura 2.5).



Figura 2.5: Campaña para mantener ventanas cerradas para evitar robos.

La seguridad es un tema que en la actualidad trasciende no solo al comportamiento de aberturas de ventanas, sino que es uno de los factores que impulsa la generación de barrios a partir de espacios residenciales cerrados (Hidalgo, 2004). Los cuales son concebidos como comunidades aisladas y resguardadas que responden al modelo de condominio, caracterizados por desarrollar condiciones de proximidad entre viviendas, dificultando la utilización de la ventilación natural.

2.3 Las torres de viento como solución a la problemática de ventilación

De acuerdo a lo planteado anteriormente, los problemas de la vivienda vinculados a la calidad del aire interior, el confort térmico, así como la dificultad de evacuar el aire húmedo, pueden ser resueltos a través de la ventilación natural. Entre las estrategias más eficientes figura la ventilación cruzada generada a partir de la abertura de ventanas, sin embargo, no siempre es posible contar con el flujo de aire necesario para ventilar adecuadamente. En los puntos previos a este apartado, se expusieron factores que dificultan la ventilación natural, entre los cuales destaca la ausencia de ventanas o bien su desfavorable ubicación respecto a los flujos del aire exterior. Lo cual, complementado con la densidad de los emplazamientos residenciales, trae como consecuencia flujos turbulentos entre fachadas y por defecto, la disminución del potencial de ventilación a partir de ventanas en las unidades. A esto se suma la dificultad de abrir ventanas por parte de los usuarios, motivados por problemas de seguridad, ruido y contaminación, terminando por desaprovechar el aporte de la ventilación natural.

Frente a la problemática de ventilación antes indicada, es que las posibilidades que entrega una torre de viento o windcatcher situado en la cubierta adquieren relevancia. Ya que dicho dispositivo de ventilación tiene la opción de enfrentar y captar los flujos de aire por sobre el nivel de la cumbrera, encausándolos al interior de la vivienda, para finalmente evacuarlos a través de la misma torre. Todo esto ocurre a pesar que la vivienda no cuente con aberturas orientadas a los vientos predominantes, ya que según lo planteado por Liu y Mak (2007) la torre está diseñada para resolver este problema, debido a que independiente de los cambios en la dirección del viento, el dispositivo puede captar y canalizar el aire fresco hacia las habitaciones (Fig. 2.6). Lo cual, permite no solo la migración del aire viciado, sino también de aquel que ha adquirido mayor temperatura en el interior de la edificación. Esto último se torna de gran utilidad, particularmente en los niveles superiores de la vivienda, los cuales quedan expuestos a problemas de sobrecalentamiento en estaciones cálidas.

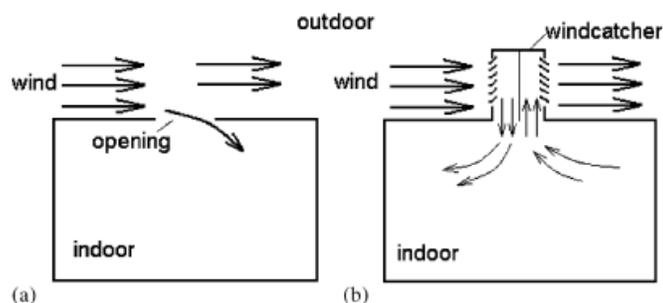


Figura 2.6: Comparación de dos habitaciones ventiladas, con un flujo disponible en la parte superior (a) Habitación sin torre de viento (windcatcher); (b) Habitación con torre de viento (windcatcher). (fuente: Liu y Mak, 2007)

Si bien la torre de viento o windcatcher se presenta en la actualidad como una tecnología en constante desarrollo, su origen se remonta a un sistema milenario de acondicionamiento ambiental, utilizado por la arquitectura tradicional de Medio Oriente. En lo que refiere a su denominación, no existe consenso entre los investigadores respecto al término de torre de viento (wind tower) o windcatcher, tanto para referirse al sistema de ventilación tradicional como a los contemporáneos. Sin embargo, actualmente la firma de ventilación natural Monodraught Ltd. protegió para su torre de ventilación el término Windcatcher™. Por lo tanto, para efectos de esta tesis, se utilizará el término de torres de viento para el sistema genérico, mientras que el de “Windcatcher” será para denominar la torre de viento moderna desarrollada por la firma antes mencionada.

2.3.1 Origen y funcionamiento las torres de viento en la arquitectura tradicional de Medio Oriente

Las torres de viento o Baud-Geers (en persa), también denominados como, windcatcher corresponden a elementos arquitectónicos utilizados para generar ventilación y refrigeración natural en las regiones cálidas y áridas de Medio Oriente y Egipto. Como principio básico funcionan captando el viento por las aberturas dispuestas en las caras superiores de la torre, encapsulándolo al interior de esta, forzándolo a descender al interior del edificio, para que finalmente el flujo ascienda por efecto chimenea por la misma torre.

La idea de utilizar los flujos de viento para acondicionar los espacios interiores, se remonta a tiempos remotos. Ya sea captándolos a través de elementos de construcción liviana, como en el caso de los captadores de viento de Hyderabad en la provincia de Sind en Pakistán (figura 2.7) o mediante altas y elaboradas torres de la ciudad de Yazd en Irán (figura 2.8). Las primeras, de menor tamaño y complejidad, cuentan con una sola cara abierta que enfrenta a los vientos predominantes, haciéndolo

descender directamente a las habitaciones que se requieren acondicionar. Mientras que las torres de Yazd no solo se constituyen como elementos de mayor altura y refinación, sino que cuentan con aberturas en más de una cara, lo cual permite captar los flujos de viento independiente del ángulo que éste pueda tomar. Por otra parte, según lo señalado por Dehnavi et al. (2012), como las torres están divididas por particiones, que en el caso de las de cuatro lados, ocurre que la mayoría de veces, una de las particiones funcionará para recibir la brisa, dejando las otras tres como conductos de salida de aire.



Figura 2.7: Captadores de viento en Hyderabad en Pakistán. (fuente: Rudofsky, 1964)



Figura 2.8: Torres de viento multidireccionales en la ciudad de Yazd, Irán (Bahadori et al. 2014)

Si bien es posible reconocer patrones de funcionamiento comunes en las torres de viento, según lo señalado por Roaf (1990) sus formas y funciones varían enormemente con: el micro, meso y macroclima; la geomorfología; las expectativas y hábitos de confort de las poblaciones, en razón a su adaptación al contexto local. Por lo mismo, a la hora de su comprensión más detenida, es recomendable no generalizar y situarse en cada caso de manera particular.

Entre los casos más estudiados figuran las torres de viento de Yazd, ciudad ubicada en la planicie central iraní, que cuenta con un clima seco, de veranos calurosos y fríos inviernos, donde la temperatura fluctúa considerablemente entre el día y la noche. Tales condiciones, determinaron una trama urbana densa con objeto de 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, los cuales producto de la densidad de la ciudad no cuentan con vientos significativos a la altura de sus fachadas (Sahebzadeh et al. 2017). De esta manera las torres toman altura para captar los flujos de viento favorables para el acondicionamiento térmico de los ocupantes. Cada torre está formada por: una columna, que permite ganar altura; la cabeza, que contiene la o las aberturas; las particiones, que son las divisiones interiores de la columna y el techo, que es la superficie que remata la cara superior de la torre (figura 2.9).

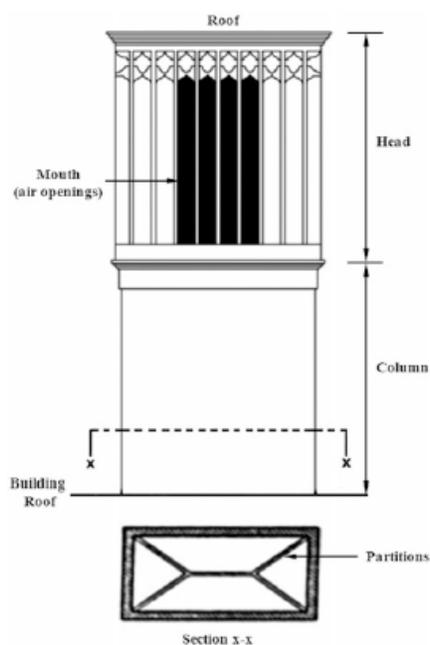


Figura 2.9: Elevación y planta de una torre de viento con sus partes principales indicadas. (Fuente: Bahadori et al. 2014).

A continuación, se representa en la (figura 2.10) el funcionamiento de una torre de viento tradicional, en la cual el aire ingresa por la abertura de la torre a barlovento (1) que cuenta con una presión de viento positiva, para descender a los recintos interiores, a través de (2) y (3). Por otra parte, el flujo de aire que en su recorrido adquiere temperatura y baja su densidad, asciende por las particiones que se encuentran a sotavento (opuestas a la abertura 1) evacuando finalmente la torre.

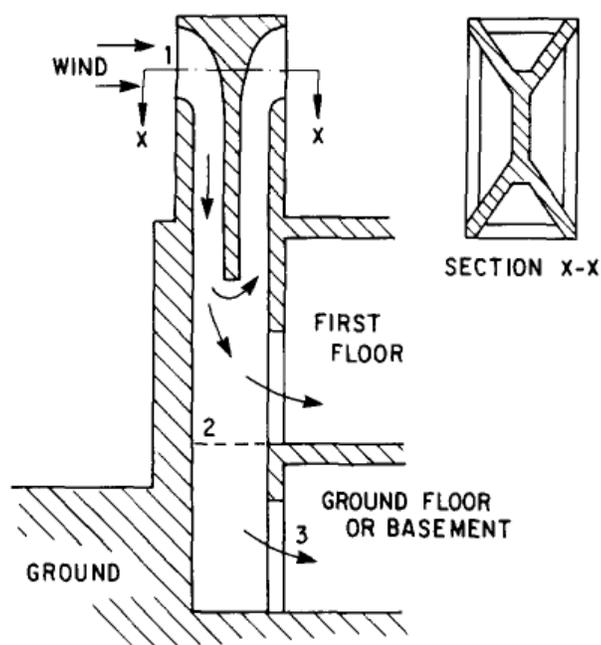


Figura 2.10: Esquema de funcionamiento de una torre de viento tradicional (Fuente: Bahadori, 1985)

Según lo señalado por Bahadori et al. (2014) en la noche cuando no hay viento y las temperaturas descienden, la torre de viento actuará como chimenea, ya que el aire fresco que ingrese por alguna ventana, absorberá el calor contenido en los muros de la vivienda, evacuándolo finalmente a través de la torre. El efecto contrario ocurrirá en el día, cuando el aire caliente que ingrese, perderá temperatura al entrar en contacto con los canales de la torre y los muros de la vivienda, ambos enfriados durante la noche, todo lo cual hará más denso el aire, apoyando su flujo descendente y por defecto su motor de ingreso a la vivienda. Existente algunos casos en que el flujo de aire ingresado en el día, pasaba sobre

depósitos de agua subterránea o estanques construidos en la zona baja de la vivienda, con el fin de enfriar y humedecer el aire por evaporación (Abdaei y Azami, 2013).

Los fenómenos antes descritos, se sustentan en el uso de los materiales de construcción, tanto para la torre como la vivienda, los cuales poseen mayor masa y por consiguiente mayor inercia térmica. En el caso de Yazd, que cuenta con amplias fluctuaciones de temperatura entre el día y la noche, se utilizó principalmente barro, ladrillos de barro, yeso y madera. La torre como tal, esta facturada por piezas de madera, ladrillos de barro y yeso, lo mismo que sus particiones. Mientras que el acabado final de las superficies y la expresión de las aberturas es trabajado en yeso, particularmente en la cabeza de la torre, otorgándole expresión y singularidad respecto a las otras que se alzan en la ciudad (figura 2.11).



Figura 2.11: Acabados y ornamentos en las cabezas de torres de viento en un barrio tradicional de Yazd (Fuente: Bahadori et al. 2014)

Tipológicamente las torres de viento se pueden clasificar de acuerdo a las caras que presenten abiertas al viento, pudiendo ser: unilaterales, bilaterales, de cuatro, seis y ocho lados, así como también cilíndricas. Siendo el de cuatro lados el más común, que en el caso de Yazd comprende el 93% de las torres existentes Bahadori et al. (2014). Otro parámetro de clasificación es según su planta, las cuales pueden ser cuadradas, rectangulares, hexagonales, octagonales y circulares. Finalmente, otro elemento diferenciador es la forma de las particiones al interior de la torre, que vistas en planta pueden estar cruzadas en forma de “X” o en ángulos rectos “+”, generando la posibilidad de generar múltiples canales para el flujo del aire (figura 2.12).



Figura 2.12: Modelo 3D de una torre de viento con canales iguales (fuente: Zarandi, 2009)

Diversas investigaciones se han centrado en el desempeño de las torres tradicionales en Yazd, utilizando para ello, técnicas de evaluación tanto numéricas, como de túnel de viento o análisis en CFD. Zarandi (2009) analizó la configuración óptima de las particiones, concluyendo que las configuradas en forma de “+” ofrecen un mejor desempeño. Similar resultado estableció Ghadiri et al. (2013) al concluir el desempeño de las particiones en forma de “+” para su análisis de torres de viento cuadradas. Por su parte Hosseini et al. (2016) evaluaron el impacto en el perfil de velocidad de aire y las temperaturas tras

modificar el ancho y la altura de una torre de viento de 4 lados, concluyendo para el caso analizado, que el ancho los 2,5 m garantiza una mejor distribución del flujo resultante y por defecto mayor confort térmico, en cambio, al aumentar la altura sobre 8 m se reduce la circulación de aire. Este último dato concuerda con lo advertido por Roaf (1990), respecto a la crisis de las torres de viento en Yazd, producto del alza en sus dimensiones en el último cuarto del siglo XIX, como consecuencia del auge económico y el estatus que significaban contar con una torre ornamentada y de mayor altura. Contradiendo con esto la ecuación de forma – función; ya que según lo planteado por Aryan et al. (2010) las torres al crecer mucho, introducían un mayor porcentaje de aire caliente del que el sistema mismo podía enfriar y con esto dejar de significar un aporte al acondicionamiento de las edificaciones.

Finalmente, podemos concluir que las torres de viento tradicionales, fueron una respuesta eficiente y sustentable a las condiciones ambientales complejas, que implican los climas cálidos y secos. Ofreciendo una estrategia de enfriamiento natural, que se valía del viento disponible y de los materiales locales para su desarrollo. En concordancia con Roaf (2005) que planteaba que no existe un diseño único de torre de viento, sino que están diseñados de manera sensible e inteligente para adaptarse a las condiciones climáticas locales.

El estudio de las torres de viento tradicionales no solo permite el entendimiento de estas innovadoras tecnologías, sino que abre caminos a nuevos prototipos, los cuales bajo el alero de su lógica podrían prestar solución a la problemática energética y ambiental actual, a través de un elemento arquitectónico de valor, como las torres que aún dominan el horizonte de áridas latitudes.

2.3.2 Modernización de las torres de viento

El enorme desafío que enfrenta la sociedad actual a partir del calentamiento global, trae consigo tareas de impacto directo en el funcionamiento de las edificaciones, tales como la racionalización del consumo de energía y las emisiones de GEI, ambos. Es por ello que, frente a la problemática de garantizar la calidad del aire y el confort térmico interior, se torna oportuno el rescate de estrategias de ventilación natural como las torres de viento provenientes de regiones cálidas y áridas de Medio Oriente y Egipto, para ser reinterpretadas por demandas de latitudes y épocas distantes, en una momentos donde las grandes demandas de acondicionamiento de edificios están bajo la cobertura de equipos mecánicos, alimentados principalmente con energías fósiles.

Entre las ventajas de las torres de viento destaca que son sistemas pasivos que no requieren energía para su funcionamiento, sin presentar contaminación ambiental de ningún tipo (Dehghani-Sanij et al. 2015). Por otra parte, son capaces de cubrir demandas de ventilación, en lugares donde las estrategias de ventilación natural, como el uso de puertas y ventanas no pueden aplicarse o bien no son suficientes para lograr el estándar adecuado.

Tomando como referencia los principios de las tradicionales torres de viento, se han realizados múltiples y variados prototipos de torres contemporáneas, los cuales han sido recopilados y caracterizados por Khan et al. (2008); Saadatian et al. (2012); Jomehzadeh et al. (2017). Entre estas revisiones, se incluye las torres de viento modernas conocidas por las marcas comerciales “Windcatcher™” y “Windvent”, correspondientes a los sistemas de torres de captación y evacuación simultánea, desarrolladas por las firmas Monodraught Ltd. y Midtherm Engineering Ltd. respectivamente (figura 2.13). Estos sistemas, de similares características, se basan principalmente en la ventilación impulsada por el viento y el efecto de flotabilidad. Ambos fenómenos se conjugan en una torre que sobresale de la cubierta de la edificación, la cual al enfrentar al viento a barlovento cuenta con una presión positiva, que favorece el ingreso del aire al interior del recinto; una vez dentro, el flujo de aire fresco impulsado por la presión del viento movilizará al aire viciado en el interior, el cual está a mayor temperatura y a menor densidad; elevándolo por efecto chimenea, para finalmente expulsarlo por los cuadrantes de extracción en la zona de sotavento de la torre. Este último punto al tener presión negativa en el exterior, genera un efecto de succión al interior de la torre, lo cual agiliza el circuito de ventilación.



Figura 2.13: A la izquierda Windcatcher™ instalado en Kings Hill Offices, West Malling, Kent (fuente: www.monodraught.com). A la derecha Windvent instalado en Castle Hill Primary School, Chessington, Londres (Fuente: www.mideng.net)

Si bien las torres de viento tradicionales podían contar con múltiples particiones o ductos interiores, en el caso de las torres modernas se simplificaron a cuatro cuadrantes de iguales dimensiones entre sí, los cuales tienen la función de ingreso o evacuación de aire, dependiendo de la dirección que pueda tomar el viento. Hughes et al. (2012) señala que el viento cambia de dirección durante periodos sobre una base horaria, diaria y estacional, por lo que el campo de presión que rodea al edificio también cambiará. Todo lo anterior, modifica y dinamiza el rol de los cuadrantes o subdivisiones interiores, dándole versatilidad al dispositivo.

Las torres de viento modernas, más allá de lo heredado por sus antecesoras de medio oriente, debieron pasar por un proceso de adaptación a las necesidades de los edificios actuales, situados en lugares muy distintos en los que dichos sistemas de ventilación fueron concebidos. El desarrollo de esta nueva tecnología data de la década de los años 90 en el Reino Unido, lugar que cuenta con la mayoría de estos dispositivos instalados. En consecuencia, uno de los primeros cambios que experimentaron, fue la materialidad de factura de la torre; pasando del adobe, ladrillo y madera que configuraban las torres tradicionales, a la fibra de vidrio, gel coat, aluminio y planchas galvanizadas, que forman parte de los materiales de las torres actuales. Materiales que no sólo son más livianos, sino que también responden a las exigencias del clima lluvioso y a los cumplimientos de las normativas de edificación vigentes (figura 2.14). Por otra parte, las torres actuales son más compactas y de menor tamaño comparadas con las tradicionales (Hughes et al. 2012). Lo anterior, se basa en la necesidad de transformar la torre de viento moderna en un producto de fabricación en serie, comercializable y de mayor cobertura para el público.



Figura 2.14: : Windcatcher™ cuadrado, de la firma Monodraught. En la imagen de la izquierda se aprecian las celosías exteriores mientras que a la derecha se pueden apreciar los divisores internos que fraccionan el sistema de ingreso y egreso de aire en cuatro cuadrantes.

Otro factor de innovación en las torres modernas es la posibilidad de control del sistema por parte del usuario (figura 2.15), ya que es posible manejar la velocidad y la dirección con la que ingresa el flujo de aire, a través de un mecanismo de amortiguadores o “dampers”, ubicados inmediatamente arriba del difusor de techo estático o “celosía de cielo” (Hughes y Ghani, 2011). Los dampers, pueden moverse de forma manual o automatizada a partir de motores de bajo consumo, los cuales tienen tres opciones de control: automático, remoto y manual. El primero es comandado por un panel de control conectado a sensores de temperatura, calidad de aire y CO₂, todo lo cual puede ser programado; el control remoto, de menos sofisticación que el anterior, le permite al usuario regular el movimiento de los dampers, mediante un comando ubicado en la pared; y finalmente, el control manual, donde los dampers son regulados por medio de una palanca que puede estar próxima al difusor o bien contar con un sistema de cuerda si la ubicación lo requiere (Monodrught, 2003).

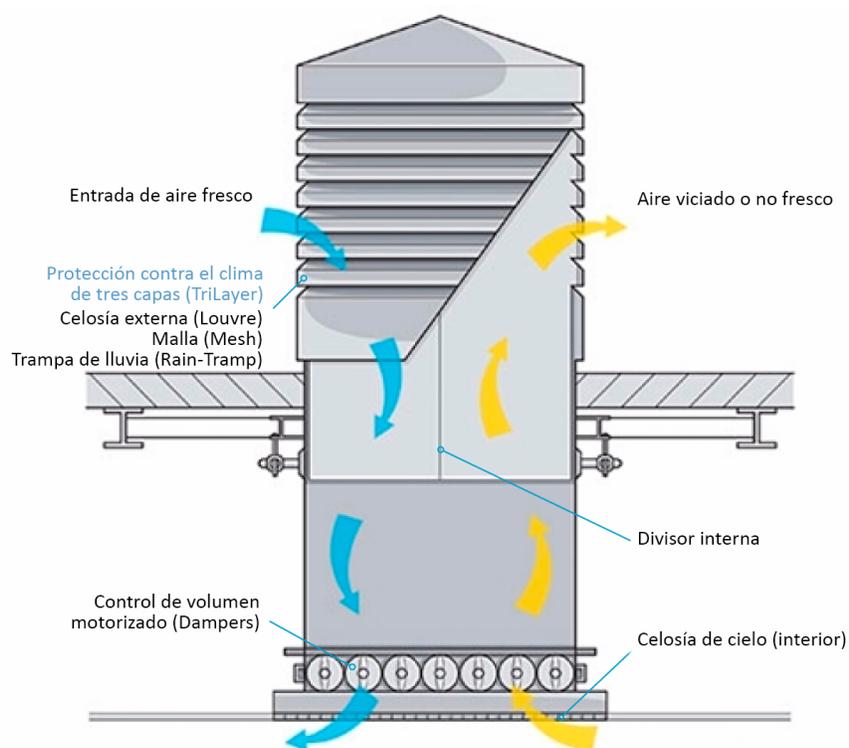


Figura 2.15: Esquema en corte del funcionamiento de un windcatcher (fuente: fuente: www.monodraught.com).

El grado de abertura que tomen los dampers, estará directamente relacionado con las demandas de ingreso y egreso de aire que el espacio asistido requiera; pudiendo incluso quedar completamente cerrados en el caso de no demandar flujos de aire externos (figura 2.16). Khan et al. (2008) señala que, en el caso de requerir ventilación nocturna durante los meses de verano, los dampers deben estar completamente abiertos para permitir que el aire fresco de la noche invada el edificio. Por otra parte, en ausencia de viento el colector funcionaría de acuerdo a las diferencias de temperatura entre el día y la noche, operando como una chimenea, posibilitando la evacuación del calor almacenado durante el día por la edificación.

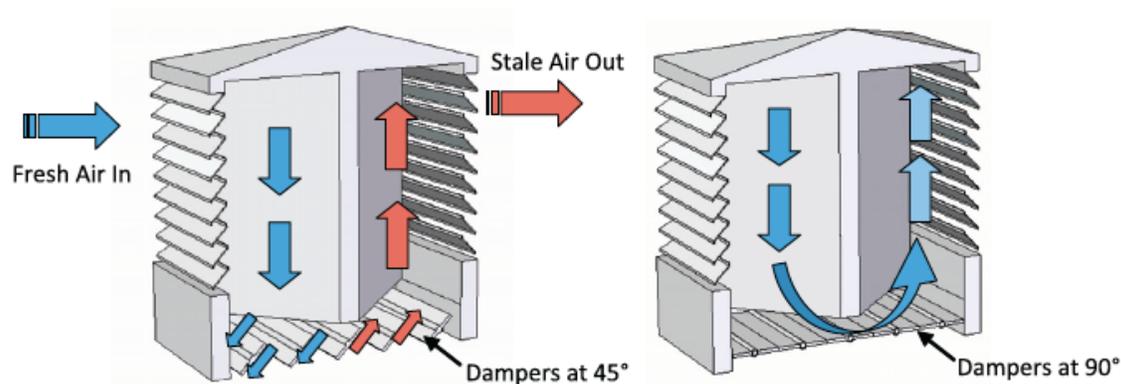


Figura 2.16: : Ilustra posiciones que pueden tomar los dampers dentro de la torre. En la izquierda, los dampers están a 45°. A la derecha los dampers a 0°, totalmente cerrados. (fuente: Hughes et al. 2012)

En relación a la disposición de las celosías externas (louvres), estas han sufrido cambios considerables, ya que según lo planteado por Khatami (2009) el diseño original de las torres de viento contaba con aberturas verticales, dado que fue concebido en climas cálidos y secos. Sin embargo, al migrar a nuevas situaciones climáticas, como en el caso del Reino Unido, las aberturas debieron replantearse horizontalmente (Figura 2.17), quedando definidas por una sucesión de láminas horizontales o lamas, dispuestas con un ángulo entre 35° y 45° para poder protegerse de las lluvias.

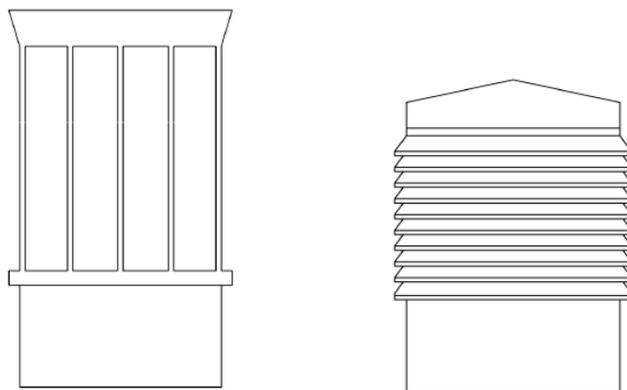


Figura 2.17: : A la izquierda, torre de viento tradicional con aberturas verticales. A la derecha torre de viento moderna con aberturas y lamas horizontales (Fuente: Khatami, 2009).

Finalmente, podemos concluir que la inserción de las torres de viento en contextos distantes a los que fueron concebidos originalmente, no solo requirió un proceso de evolución y adaptación respecto a las condiciones climáticas, sino que también de diálogo con la cultura arquitectónica y constructiva que los recibe. Todo lo cual, representa un punto de interés para la presente investigación, puesto que abre un espectro de posibilidades en nuevas latitudes, sumando nuevas variables de uso que permitan evolucionar el estado de conocimiento de este dispositivo, con el fin de ofrecer soluciones pasivas de ventilación natural frente a los desafíos ambientales y energéticos actuales.

2.3.3 Estudios de desempeño de las torres de viento modernas

Las torres de viento modernas tienen como base el conocimiento técnico forjado por años de uso, por parte de las torres de viento tradicionales, pertenecientes a la arquitectura vernácula de Medio Oriente. Sin embargo, para situarse como solución eficiente a las actuales problemáticas ambientales, ha sido necesario desarrollar las bases tecnológicas que permitan el proceso de adaptación y evolución. Dicha base de conocimiento se nutre de trabajos de investigación que han profundizado tanto en el fenómeno físico del sistema, como también en los diferentes componentes y configuraciones de la torre en función de su desempeño.

En su revisión de los estudios generados en torno a los a las torres de viento modernas, Jomehzadeh et al. (2017) señala que los análisis de rendimiento se pueden realizar utilizando dos enfoques principales:

método experimental y teórico. El primero, puede efectuarse a escala completa, correspondiente a casos de estudio que se pueden investigar en un entorno real (in situ) o bien analizar en laboratorio con modelos de pequeña escala. Mientras tanto que el enfoque teórico, permite clasificar modelos analíticos y numéricos. Destacando el uso de los modelos numéricos llevados a cabo mediante simulaciones en CFD (dinámica de fluidos computacional). Esta última herramienta ha permitido desarrollar y optimizar complejos diseños 3D, con alta resolución para analizar patrones de temperatura, velocidad y flujo de aire tanto alrededor como dentro de modelos tridimensionales, con un costo mucho menor a un ensayo de laboratorio. Respecto a la validación de las técnicas de evaluación a través de CFD han sido comparadas y comprobadas con ensayos experimentales.

Elmualim (2006 a) tras comparar el desempeño de una torre de viento medida en un ensayo de túnel de viento y a través de simulaciones en CFD (figura 2.18) resalta las bondades de esa última herramienta, sin embargo, advierte, que no todos los softwares están diseñados específicamente para modelar ventilación natural, por lo que se requiere experiencia y mucha precisión en el origen de los datos de entrada. Por su parte Calautit y Hughes (2014 a) al confrontar las mismas herramientas de medición anteriores (túnel de viento y CFD), encontró una buena correlación entre datos numéricos y experimentales, con un error promedio dentro del rango de un 10%, lo cual confirma la validez del método a partir de CFD.

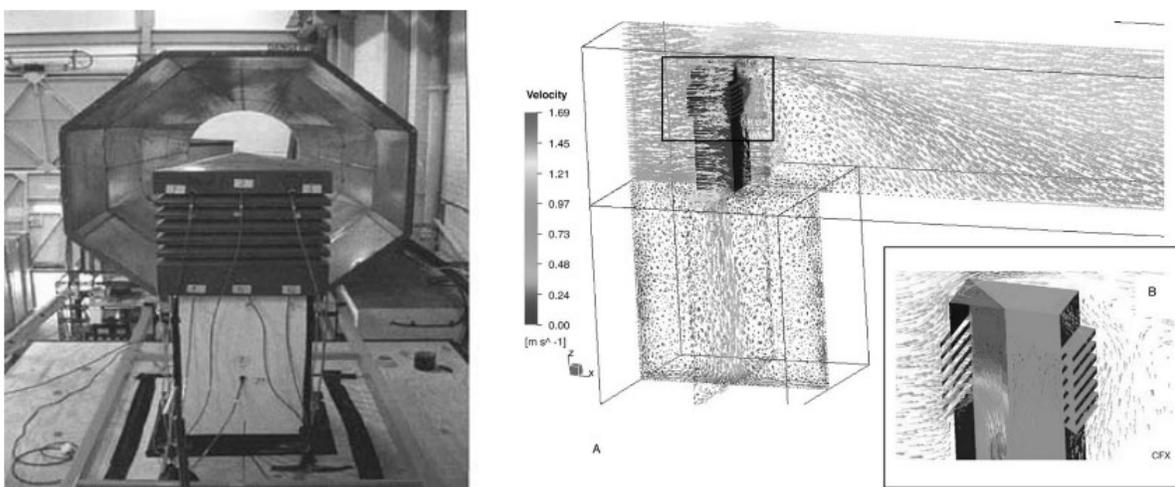


Figura 2.18 : En la imagen de la izquierda prueba experimental en el túnel de viento para un torre de viento. A la derecha, la misma torre es evaluada mediante simulación en CFD (fuente: Elmualim, 2006 a).

Con respecto al funcionamiento de la torre de viento moderna Hughes y Mak (2011) por medio de CFD y método experimental, pone a prueba las dos principales fuerzas que impulsan el flujo a través de estos dispositivos: el viento externo y la flotabilidad debido a la diferencia de temperatura. Estableciendo que el viento es la principal fuerza motriz para esta estrategia, la cual aporta con un 76% más a la ventilación interna, que lo que aporta el flujo impulsado por flotación (efecto chimenea). De este modo, complementa lo establecido por Jones y Kirby (2009) quien plantea que los efectos de la flotabilidad pueden despreciarse para velocidades de viento superiores a 2 m/s.

Por otra parte, Calautit y Hughes (2014 a) realizaron un análisis detallado del flujo de aire interior, a partir de un análisis de CFD y pruebas de túnel de viento en un modelo a escala. Tomando como objeto de estudio una torre de viento comercial de cuatro lados, que fue modelada con 7 lamas montadas a 45°, sin damper y expuesta a una velocidad de viento externo de 3 m/s (figura 2.19). De este modo obtuvieron que la velocidad promedio del flujo de aire que sale del cuadrante de la torre e ingresa en la habitación es de 1,62 m/s; reduciéndose a 1 m/s cuando el flujo se acerca al piso, para finalmente extenderse en todas direcciones, causando recirculación de aire a 0,20 m/s dentro de la habitación, mientras que la velocidad promedio en la habitación fue de 0,55 m/s. Todo lo anterior, evidencia la importancia de considerar la ubicación de la torre de viento en la habitación, además de amortiguar y dirigir la corriente de aire, con el fin de evitar la sensación incomoda de una corriente de aire intensa sobre las personas.

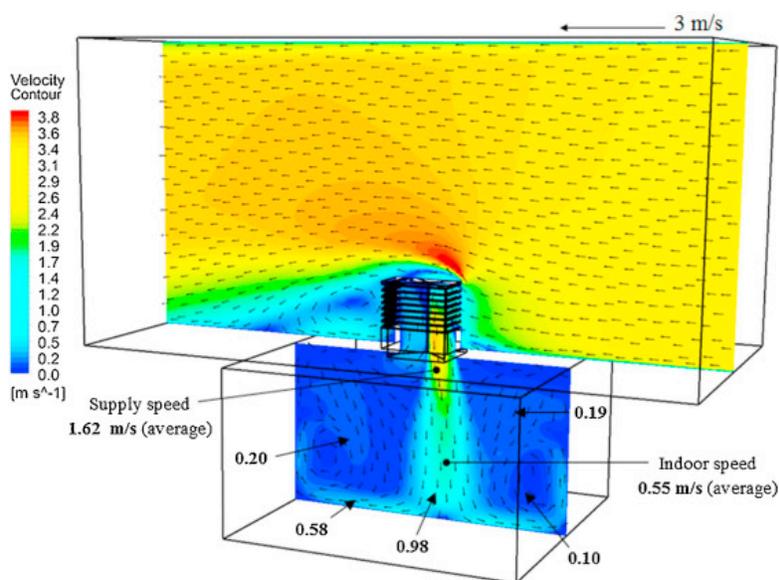


Figura 2.19: Diagrama de contorno de velocidad en CFD visualizando el comportamiento del flujo al interior de una habitación de prueba. (fuente: Calautit y Hughes, 2014 a)

A partir de las mismas pruebas Calautit y Hughes (2014 b) contrastaron en otro trabajo de análisis, el comportamiento del flujo mediante visualización de humo en el túnel de viento, así como a través de vectores en CFD. Reconociendo que la principal masa de flujo de aire que ingresa se dirige hacia el piso, golpeado en este, para luego ralentizarse y fluir a través de las paredes laterales, donde finalmente escapará por los cuadrantes que se encuentran a sotavento. Al mismo tiempo, es posible evidenciar que parte del aire que entraba por el cuadrante de ingreso de la torre, estaba saliendo inmediatamente a través de los cuadrantes de egreso, generando un corto circuito (Figura 2.20).

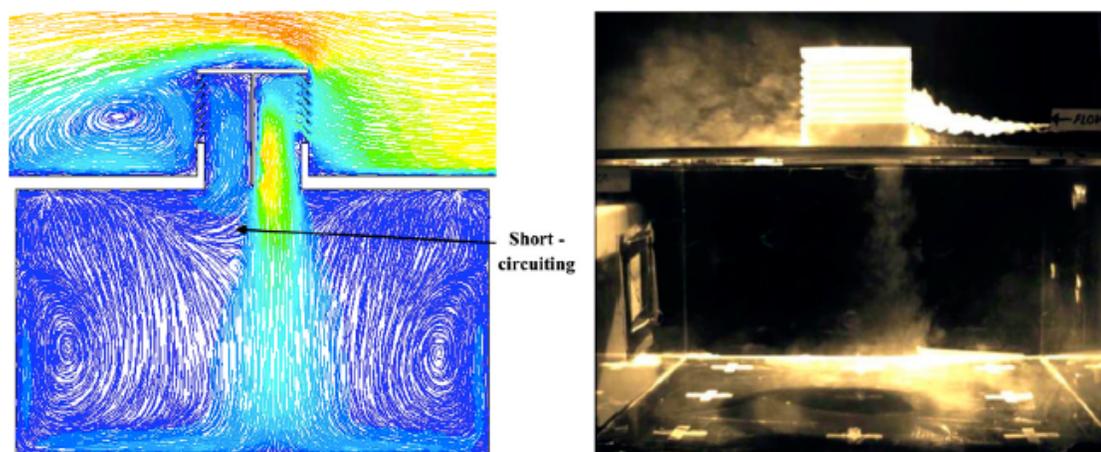


Figura 2.20: Análisis de flujo para una habitación asistida por una torre de viento. A la izquierda, visualización de flujos a partir de análisis CFD. A la derecha prueba de humo en túnel de viento para las mismas condiciones de análisis (fuente: Calautit y Hugh, 2014 b).

En lo que respecta al desempeño de las torres de viento modernas, estas se han medido principalmente en la calidad del aire interior y el confort térmico resultante para los recintos evaluados. En lo que refiere a la calidad de aire, Alshitawi et al. (2009) a partir de mediciones in situ al interior de un aula equipada con una torre de viento en la Universidad de Reading, Reino Unido, evaluaron las concentraciones de partículas y la tasa de cambio de aire. Dicha medición se realizó bajo dos modos: con los dampers de la torre cerrados y con los dampers totalmente abiertos. Arrojando para el primer modo una tasa de cambio de aire interior de 1,75 ACH, mientras que para el segundo caso se obtuvo una tasa de 3,2 ACH, lo cual demostró el aporte significativo de la torre de viento a la renovación de aire del recinto asistido.

Calautit et al. (2014) realizaron un análisis en CFD de múltiples torres de viento ubicadas en un mismo edificio, sin embargo, para efectos de establecer un parámetro para su estudio, evaluaron una torre de

viento aislada, la cual entregó una tasa de ventilación de 13,50 l/s por persona, valor que resultó favorable en relación a tasa de 10 l/s por persona establecida como parámetro para la garantizar calidad de aire interior.

Respecto al impacto en las temperaturas Elmualim (2006 b) evaluó el desempeño de una torre de viento instalada para servir a un recinto, ubicado en un clima templado durante el período de verano en el Reino Unido. El rendimiento analizado por medio de mediciones de gas trazador de ventilación, medidas de temperatura del aire interior, humedad, CO₂ y encuestas a los ocupantes, establecieron que el diseño del dispositivo elegido proporcionó una tasa de ventilación sustancialmente mayor que el área equivalente de una ventana que se pueda abrir. Además, constató que el enfriamiento nocturno se maximizó al usar el dispositivo en combinación con abertura de ventanas, ya que se logró mantener la temperatura máxima del interior al mismo nivel o por debajo de la temperatura máxima del exterior.

Ji et al. (2012), mediante simulaciones en EnergyPlus evaluaron el comportamiento térmico de un edificio de oficinas asistido por una torre de viento en Beijing, China, la cual presentó una reducción de la temperatura interior de 2°C. Por otra parte, lograron establecer el aporte de la torre en el enfriamiento nocturno, ya que, tras el uso de este, se obtuvieron temperaturas interiores más bajas a la mañana siguiente, reduciéndolas en promedio 4,2 °C en la primera hora de ocupación, además de posponer de una a dos horas las temperaturas máximas.

Por otra parte, la ventilación nocturna es una estrategia válida para mejorar el ambiente térmico tanto para edificios con y sin ocupación durante la noche. En este contexto los potenciales beneficios de la torre de viento son amplios, ya que incluyen la capacidad de proporcionar enfriamiento nocturno sin presentar riesgos de seguridad, además de ventilación diurna sin depender de la apertura de ventanas. Jones et al. (2008) realizaron una medición in-situ para aulas de una escuela en Reino Unido con una torre de viento instalada, la cual proporcionó un enfriamiento nocturno significativo, ya que la sala probada se enfrió a una temperatura promedio de 2,8 ° C durante la noche, enfriamiento que puede extenderse a las primeras horas de la mañana.

En lo que se refiere a la posición exterior de la torre de viento Su et al. (2008) compararon la presión ambiente de los caudales entregados por una torre instalada en un techo inclinado y una instalada en un techo plano; concluyendo que un techo inclinado es más favorable que un techo plano, dado que es muy probable que la torre se encuentre en una región de separación de flujo que normalmente comienza en el borde frontal de un techo plano. Lo cual implica que la velocidad del viento, en esta área de

separación de flujo, es menor que la de la corriente principal, reduciendo los caudales aprovechables. En una línea de investigación similar Hughes et al. (2012) plantearon la efectividad de ubicar la torre en la cara del techo más expuesta al viento predominante, con el fin de orientar las aberturas de ingreso de aire a la zona de mayor presión, definiendo al centro de la techumbre como el punto de mayor desempeño.

Calautit et al. (2014) a partir de análisis en CFD evaluaron el espaciado y disposición óptimo entre torres de viento en función de su rendimiento de ventilación. En este caso se analizaron torres de viento que servían a un mismo espacio interior. Determinando que la estela creada por la torre que está a barlovento impide un flujo de aire significativo en la torre de viento siguiente. Concluyendo para las torres de viento dispuestas de forma paralela, que a medida que el espaciado entre torres aumenta, la influencia de la estela que deja la primera torre de viento se reduce, aumentando la velocidad del aire en el cuadrante de entrada de la torre de viento siguiente (figura 2.21, caso 1-3). Mientras que, para el caso de torres escalonadas, con distancia encima de los 3 m entre ellas, no solo disminuye el efecto negativo de estela, sino que las torres siguientes se ven beneficiadas (figura 2.21, caso 4-6). Finalmente se advirtió la posible reentrada de los contaminantes del aire interior a un espacio ventilado por una segunda torre, producto del fenómeno de proximidad.

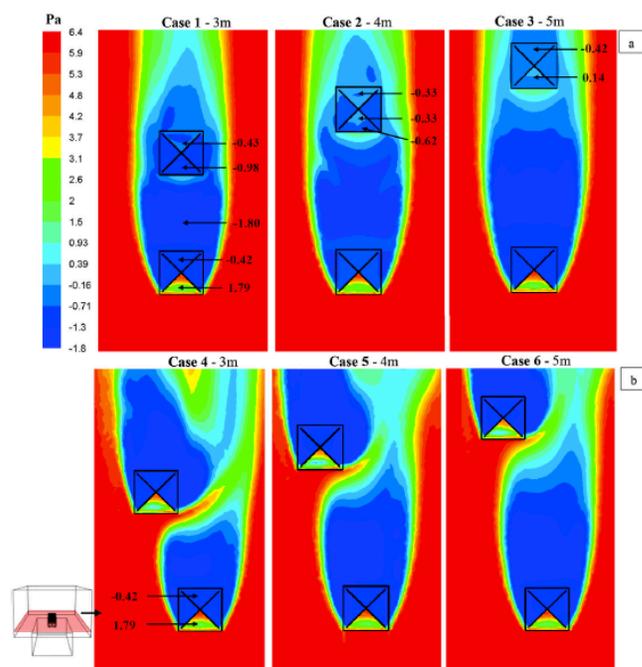


Figura 2.21: Visualización de contorno del CFD que compara el efecto del espaciado de 3 a 5 m sobre la presión entre torres de viento: (a) disposición paralela, caso 1-3 (b) disposición escalonada, caso 4-6. (Fuente: Calautit et al., 2014)

Con el fin de conocer el impacto de la forma y la orientación de la torre respecto a los vientos, Elmualim y Awbi (2002) a través de análisis experimentales y simulaciones en CFD, evaluaron el rendimiento de torres de viento de sección cuadrada y circular; concluyendo que los bordes afilados de las cuadradas, crearon una mayor región de separación de flujo y diferencia de alta presión a través de las aberturas del dispositivo, haciéndolo más efectivo que la torre de viento de forma circular. Por otra parte, este estudio arrojó que la velocidad de ventilación disminuye con el aumento en los ángulos de incidencia del viento de 0° a 45° , respecto de la cara torre que enfrenta al viento predominante.

En una línea similar Liu y Mak (2007) mediante pruebas en CFD para una torre de viento cuadrada, establecieron que la velocidad del flujo del aire que ingresa a la habitación, aumenta con la velocidad del viento y disminuye ligeramente con el ángulo de incidencia del viento cuando su velocidad es inferior a 3 m/s. También observaron que cuando el ángulo de incidencia del viento es de 0° , la velocidad máxima de entrada del aire en la habitación es más cercana a la velocidad del viento externo.

Maneshi et al. (2012) evaluaron el desempeño de torres de viento de diseños cuadrados y circulares a través de análisis en CFD, demostrando que un sistema de sección transversal cuadrada presenta mayor eficiencia que el circular a diferentes velocidades de viento, ángulo de incidencia y alturas. Estableciendo además, que el sistema cuadrado exhibe un mejor rendimiento en ángulo incidente de viento de 0° que a 45° . Sin embargo Calautit y Hughes (2014 b) al precisar la prueba, encontraron que para una torre de viento multidireccional, la máxima eficiencia se alcanzaba en el ángulo de 45° , ya que con este ángulo de viento, se logró un caudal volumétrico un 32% más alto que el del ángulo de 0° , concluyendo que en esta última orientación actúa un cuadrante de suministro y tres de escape, mientras que con el viento incidiendo a 45° , la provisión del flujo es ejercida por dos cuadrantes, dejando a los otros dos para escape.

En cuanto a las celosías externas (louvres) de las torres de viento, el ángulo de las lamas tiene un rol importante en la forma de entrar y salir del dispositivo de ventilación. Una rejilla diseñada adecuadamente minimizará la resistencia al viento y maximizará la tasa de flujo de aire interno (Hughes et al. 2012). En relación a este tema Saadatian et al. (2012) plantearon en una revisión al desarrollo tecnológico de las torres de viento, detectando que estas normalmente tienen el ángulo de las lamas a 45° , sin embargo, advierten que algunos estudios han precisado variaciones a este ángulo. Como el caso de Hughes y Ghani (2010) quienes investigaron el efecto de alterar el ángulo externo de las lamas de las celosías externas de una torre de viento, evaluando velocidad y presión mediante análisis en CFD,

concluyendo que un ángulo de celosía de 35° proporciona un rendimiento óptimo para los parámetros analizados, incluso por sobre el ángulo de 45°.

Por otra parte, los dampers, como responsables de regular el flujo entrante y saliente al recinto asistido por la torre de viento, también han sido foco de investigación. Hughes et al. (2009) mediante un análisis numérico en CFD, lograron concluir que el funcionamiento óptimo para una torre ocurre en un rango de ángulo de los dampers de 45° a 55°, para una velocidad del viento externo promedio de 4,5 m/s en Reino Unido (figura 2.22).

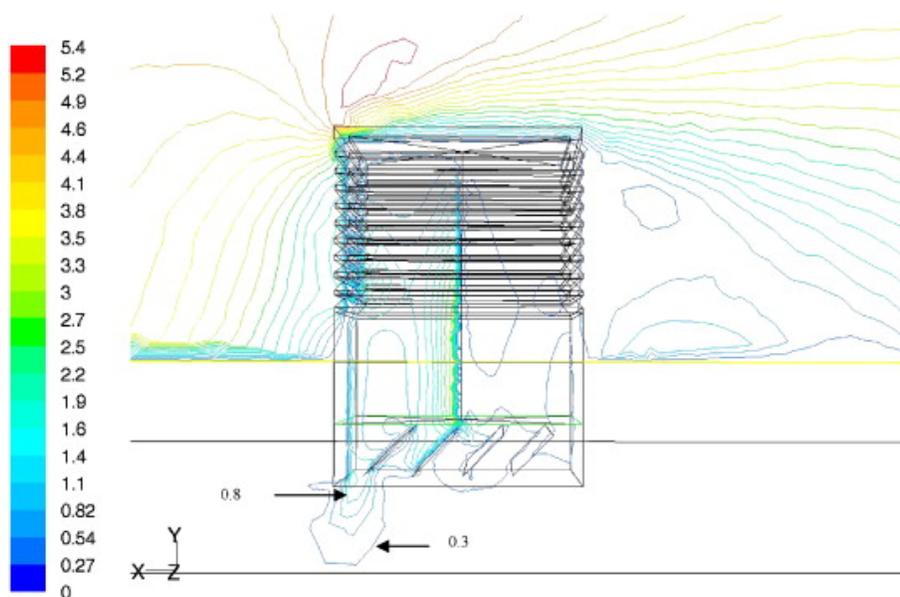


Figura 2.22: Contornos de velocidad calculados para una torre de viento con dampers a 45° (fuente: Hughes et al., 2009).

Finalmente, podemos plantear que las torres de viento modernas se presentan como una solución eficiente para el mejoramiento de la calidad del aire y el control de las temperaturas interiores de las edificaciones. Destacando el proceso de adaptación y evolución tecnológica experimentado por estos dispositivos, desde sus raíces vernáculas en Medio Oriente, hasta situarse frente a las demandas energéticas y ambientales de la actualidad. Sin embargo, tras realizar el levantamiento del estado del conocimiento, respecto a las torres de viento, se puede verificar que la mayoría de las investigaciones se han centrado en la configuración de la torre como elemento y su correspondiente rendimiento,

profundizado en parámetros como: forma, dimensión, orientación, ubicación en la techumbre, celosías externas y dampers. Generándose un área de conocimiento poco cubierta, que guarda relación con las variables urbanas y arquitectónicas que inciden en el desempeño de una torre de viento, tales como: el impacto de las edificaciones próximas; niveles de aberturas a los vientos, por parte de las tipologías edificatorias; variaciones del diseño interior del o los recintos asistidos por una torre de viento, así como también la influencia de los patrones de usos, dados por las actividades de los ocupantes. De igual forma se pudo evidenciar en el levantamiento de estudios de las torres de viento, una fuerte inclinación por el análisis de edificaciones de uso colectivo, como edificios de oficina, comerciales y colegios, reconociendo como casos puntuales las investigaciones que se centran en edificaciones con destino habitacional, punto no menor en consideración al consumo de energía que este sector representa.

Capítulo 3

Metodología

3.1 Propuesta metodológica

3.1.1 Metodología de evaluación para abordar los objetivos del estudio

Con el fin de resolver los objetivos planteados en la presente tesis, se propone desarrollar una metodología que permita evaluar el desempeño de una torre de viento incorporada a una tipología de vivienda de condominio que cuente con riesgo de sobrecalentamiento y dificultad de ventilación, integrando variables arquitectónicas y condiciones de clima local. Para lo cual se plantearon dos etapas de análisis, la primera que evalúa al caso de estudio en su conformación de conjunto, estableciendo las condiciones de ventilación externas de la vivienda. Mientras que la otra etapa de análisis, está conformada por la evaluación de la vivienda como fenómeno individual, enfocándose particularmente a nivel de ático, que es el área donde se centra la problemática de confort térmico debido a las altas temperaturas en verano, así como también es el recinto que cuenta con la influencia directa de la torre de viento (ver esquema general de la metodología en 3.6.1).

La matriz de evaluación es aplicada al caso de estudio que presenta dos variantes, una que corresponde al caso base y la otra al caso base con la torre de viento incorporada, esto permite realizar un análisis comparativo, con objeto de evidenciar el desempeño de la torre de viento como estrategia de ventilación natural.

La primera etapa de la matriz, vinculada a la evaluación de los flujos externos (desarrollada en el capítulo 5) contempla variables de orientación respecto a los vientos predominantes por parte del caso de estudio en su calidad de conjunto, obteniendo de esta forma su potencial de ventilación en función de los elementos adyacentes, así como los perfiles de exposición de las aberturas que presenten tanto las viviendas como el área de captación de las torres de viento (ver esquema matriz evaluación externa en 3.6.2).

En lo que respecta a la evaluación interior (capítulo 6), ésta permite establecer el desempeño de la torre de viento como estrategia de ventilación natural a partir del comportamiento de las temperaturas interiores del ático, considerando para ello variables tanto de orientación como de diseño interior (subdivisiones), así como de uso por parte de los ocupantes. (ver esquema matriz evaluación interna en 3.6.3). Obteniendo resultados de flujos de aire interior, así como las temperaturas operativas, las cuales serán analizadas respecto al rango de confort establecido a partir del modelo adaptativo.

Por otra parte, se establece un escenario climático, dado por un día representativo en el cual se contrasten todas las variables consideradas para evaluar el desempeño de la torre de viento respecto al caso base (ver escenario climático de análisis en 6.2.1)

En relación a la herramienta de evaluación, se proponen simulaciones a través de software que permitan abordar tanto el análisis de flujos exteriores, como el comportamiento térmico del interior del ático con una torre de viento incorporada.

Finalmente, los resultados tanto de la evaluación exterior como interior contenidos en la matriz, serán llevadas a tablas y gráficos para ser comparadas entre la variante del caso de estudio base y el que tiene incorporada la torre de viento, estableciendo de esta forma la pertinencia de esta última en función de su desempeño.

3.1.2 Condiciones del caso de estudio

Tomando en consideración la problemática de la presente investigación, se plantea que el caso de estudio deba responder a una tipología de vivienda que represente y abarque las circunstancias que facilitan el sobrecalentamiento, así como también cuente con dificultades para el control de este último fenómeno a través de la ventilación natural. Por otra parte, es esperable que dicha tipología pertenezca a un contexto edificatorio, cuyas condiciones de proximidad entre viviendas afecten el aprovechamiento de la ventilación natural mediante sus fachadas.

En lo que refiere al lugar para situar al caso de estudio, éste debe considerar un asentamiento urbano que presente patrones de desarrollo que den cabida a conjuntos habitacionales que sufran de densificación y con ello problemas de proximidad entre unidades. En lo que respecta al clima, dado lo detectado en el planteamiento del problema, éste debe corresponder a un clima templado húmedo o

costero, ya que, por un lado, en los climas templados las edificaciones están menos preparadas a los sucesos de altas temperaturas de las estaciones cálidas, mientras que la condición de costero, asegura brisas frescas aprovechables mediante estrategias de ventilación natural por captación, como las que proporcionan las torres de viento.

Tanto la selección como la caracterización del lugar y el caso de estudio están desarrollados en el capítulo cuatro de la presente tesis.

3.2 Selección del software de simulación

3.2.1 Criterios de selección del software

Para la elección del software de simulación se debe considerar por una parte la amplitud de escala del análisis, así como también la particularidad que conlleva evaluar un dispositivo de ventilación como una torre de viento. Esto último, implica el requisito del software para integrar los aportes por ventilación natural en sus cargas, ya sea por ventanas como por ductos y celosías, los cuales puedan ser programables en sus aberturas, representando con ello los perfiles de operación de los usuarios.

Por otro lado, el software debe operar en estado dinámico, ya que se requieren registros a lo menos cada una hora para contrastarlos con las condiciones ambientales exteriores, lo cual cobra valor bajo el análisis de adaptabilidad de los ocupantes. También, se debe considerar la posibilidad de editar e incorporar los materiales de construcción y sus propiedades físicas con objeto de precisar el comportamiento térmico del modelo.

Finalmente, frente a los requisitos expuestos se optó por el software Integrated Environmental Solutions, Virtual Environment (IESVE), el cual cubre lo demandado por la investigación y además cuenta con modelaciones de torres de viento (Windcatcher™) entre sus componentes, lo cual aporta en la precisión de los componentes geométricos de estos dispositivos de ventilación, reduciendo errores para el posterior análisis.

3.2.2 Validación del software seleccionado

En lo que refiere a la validación del software IES, éste cuenta con los siguientes estándares aprobados: ASHRAE 140: 2001, 2004, 2007, 2014; CIBSE TM33; UNE EN 1379: 2000. Además, las aplicaciones de IES pueden llevar a cabo las siguientes metodologías: ASHRAE 90.1 Performance Rating Method (PRM): 2004/07/10/13/16; ASHRAE 55 Calculation Procedure; CIBSE Guide A/ISO 7730 Calculation procedure; ASHRAE 90.1 Energy Cost Budget Method (ECM): 2010/13/16; ASHRAE 62.1 Calculation Procedure; UK National Calculation Methodology (NCM).

3.3 Metodología de evaluación del caso de estudio

3.3.1 Propuesta de integración de evaluación externa e interna del caso de estudio

Al realizar un análisis del desempeño de la ventilación natural a través de simulaciones, se evidencia la complejidad que implica integrar el análisis de los flujos del aire exterior al del ambiente interior. En torno a esto Bre y Gimenez (2019) advierten la necesidad de integrar información crucial como la distribución de la presión inducida por el viento en las superficies del edificio, fenómeno caracterizado generalmente por el coeficiente de presión del viento, el cual está directamente asociado con las tasas de cambio de aire, convirtiéndose en un parámetro relevante en la simulación del consumo de energía, el confort térmico y la calidad del aire de los edificios. En el caso del análisis de la presente tesis, se propuso realizarlo a partir de las condiciones disponibles dentro del mismo paquete de software.

En primera instancia, como base para generar el modelo de análisis, se requirió modelar la vivienda como unidad, la cual actuó como base para generar el modelo del conjunto de viviendas, dicha modelación fue realizada en ModellIT, que es el componente para la construcción de modelos 3D del entorno virtual IES.

Con el conjunto de viviendas modelado, se realiza la primera etapa de la evaluación, mediante MicroFlo, que es la herramienta de análisis CFD de IESVE, la cual permite obtener una estimación del flujo de aire entregado por el viento alrededor de la vivienda inmersa en el conjunto y a partir de ello determinar los tipos de exposición, con los coeficientes de presión asociados que incidirán en las aberturas de la evaluación interior. Conectándose ambos análisis por medio de los perfiles de exposición asignados tanto a las fachadas como a las aberturas que conforman el modelo, los cuales condicionaran los flujos

de aire para efectos del cálculo de ventilación natural al interior de la vivienda. Finalmente, estos últimos datos son procesados por MacroFlo, que es la aplicación de IES responsable de evaluar la viabilidad de las estrategias de ventilación natural, permitiendo determinar el impacto de la orientación de la vivienda en los flujos ingresados tanto por las ventanas como por la torre de viento. Por último, la segunda fase de la evaluación interior, está dada por el análisis de las temperaturas operativas interiores, las cuales son obtenidas a través del simulador termo - dinámico de IES “Apache”.

3.3.2 Datos de entrada simulación

Datos climáticos: Los datos incorporados, deberán pertenecer a bases de datos de años típicos, extraídos de la estación meteorológica más cercana al lugar de estudio, debiendo guardar relación con los datos promedio de los valores climáticos establecidos por la norma (ver 6.2.1 Datos climáticos).

Propiedades de los materiales: Las propiedades termo-físicas de los materiales deberán ingresarse acorde a lo especificado en el caso de estudio. Para ello deberá incorporarse la información necesaria, para establecer el comportamiento térmico de la envolvente levantada en el modelo de simulación. La cual deberá ingresarse capa por capa, hasta especificar la totalidad de los componentes que constituyen la solución constructiva del modelo. Destacando el hecho de que la correcta incorporación de estos datos, permite aportar en la fiabilidad de los fenómenos de transferencia de calor entre el ambiente interior y el exterior en el proceso de la simulación térmica. Por lo mismo las propiedades termo-físicas de los materiales, así como la capacidad de absorción solar y emisividad de las superficies, deberán ser extraídas de listados normados o bien de las especificaciones técnicas de los fabricantes como las bases de datos de software (ver 6.2.2 Propiedades físico - constructiva de los materiales).

Condiciones de exposición al viento: Para el cálculo de presiones de viento y su efecto en las condiciones del ambiente interior. Se debe considerar la incorporación de datos respecto a los tipos de exposición que representan las superficies externas del modelo. Para ello se incorporarán los valores observados en la evaluación externa del caso de estudio. Por su parte las presiones del viento incidentes en las superficies externas del modelo, obedecerán a la lectura del archivo climático ingresado.

Perfil de ocupación: Para poder establecer el comportamiento energético de la vivienda en análisis, es necesario conocer el comportamiento del usuario y para ello se deberá plantear un perfil de ocupación. Esto en razón de que el tiempo que permanezcan los ocupantes en la vivienda, condicionaran el estado

energético de esta. Ya sea asociado al consumo de energía y al aporte de calor derivado de las actividades de los ocupantes como el encendido de luces o el uso de aparatos domésticos. O bien la manipulación de la abertura de puertas y ventanas como estrategias de ventilación natural en periodos cálidos. Por lo tanto, para lograr un comportamiento más realista de la vivienda en análisis se realizará un perfil de ocupación, que permita ponderar las horas de actividad, aportes energéticos, así como las horas en que el usuario podrá controlar abertura de ventanas y puertas, o bien el cierre de estas por motivos de seguridad en su ausencia (ver 6.2.4 Perfil de ocupación).

Perfil de abertura de ventanas: Respecto a los perfiles de abertura, se debe tener en consideración que esta investigación propone un análisis comparativo entre el comportamiento del ático de la vivienda con y sin la incorporación de una torre de viento. Para ello es necesario conocer el impacto que genera las aberturas de puertas y ventanas en las condiciones ambientales del ático. De esta manera se puede establecer la incidencia de la torre, ya sea operando de manera autónoma o en combinación con el aporte de las ventanas y puertas en el desempeño de la ventilación natural.

En Razón al interés del análisis es que los periodos de aberturas tanto de ventanas como puertas, obedecerán a los perfiles de ocupación ingresados (ver 6.2.5 Perfil de abertura de ventanas). Con el fin de que respondan a rutinas representativas y no caigan en simplificaciones de modelos que ajusten el comportamiento de los usuarios en un control estandarizado que aleje su capacidad de respuesta a las condiciones ambientales, propias de personas reales en edificios reales (Borgeson y Bager, 2008).

Ganancias internas: Respecto a los aportes energéticos, estos deberán tomarse a partir de la caracterización del caso de estudio, distinguiéndose equipos y artefactos que porten energía, así como el número de ocupantes y el perfil de ocupación, establecido para la evaluación. Ya que según Yao y Steemers, (2004) para visualizar la carga de energía, es esencial identificar el patrón de uso de energía de una casa y predecir el perfil de carga doméstica. Si bien, son escasos los datos respecto a valores de ganancia internas en viviendas, para el caso de Chile. Se debieron recopilar estos datos a partir de tablas normadas, las especificaciones técnicas de los equipos, debiéndose incorporar las ganancias de calor emitido en el espacio interior que influye en el comportamiento de las temperaturas, reconociéndose valores por ocupantes, iluminación, equipos y artefactos de uso doméstico (ver 6.2.6 Ganancias internas).

3.4 Modelo de confort térmico seleccionado para evaluación

Con el objeto de evaluar el impacto en las temperaturas interiores de la vivienda, tras el uso de la torre de viento, es que se utilizarán las temperaturas límite que dicte el estándar de confort térmico aplicado al caso de estudio.

La elección del modelo de confort para aplicar al caso de estudio, considera los antecedentes expuestos en el punto 2.2.4 de la presente tesis. En dicho capítulo- se realizó un levantamiento de los modelos de confort y de las normas que los respaldan (ISO 7730 - 2005; EN 15251 - 2007 y ASHRAE - 2017). Como primer paso, se seleccionó el modelo adaptativo de confort, ya que este ha profundizado en las condiciones de confort para espacios naturalmente ventilados (Dear y Brager, 1998; Nicol y Humphreys, 2002; Ferrari y Zanotto, 2012; Forgiarini et al 2015; Attia y Carlucci, 2015; Pérez et al, 2018), lo cual se ajusta a las condiciones de destino residencial del caso a evaluar y particularmente a la no incorporación de equipos de aire acondicionado. Este argumento permite excluir el modelo de confort desarrollado en UNE-EN 7730, ya que el modelo de balance térmico en el que se basa esta última norma, estima la sensación térmica de manera más precisa en edificios acondicionados mecánicamente. Esto último según Sánchez et al. (2016) proviene de la menor dependencia de los edificios mecánicamente acondicionados a las temperaturas exteriores y a las menores posibilidades de adaptación en comparación con edificios ventilados de forma natural.

Actualmente, tanto ASHRAE 55 como UNE ISO 15251 incorporan oficialmente en su estándar el enfoque adaptativo, generando rangos de temperatura más amplios que los arrojados con el modelo estático de Fanger (Attia y Carlucci, 2015). Lo anterior, debido a la posibilidad de aclimatación y las expectativas desarrolladas por los moradores respecto de las condiciones exteriores. Por otra parte, entre las dos variantes del modelo adaptativo, para efectos de este estudio se consideró más idóneo la aplicación del método propuesto por ASHRAE 55, dado que éste abarca un mayor espectro de zonas climáticas en la construcción de su base de datos, al basarse en el proyecto ASHRAE RP-884 que recopiló observaciones de sensación térmica en estudios de campo en 160 ciudades, en 9 países de 4 continentes (De Dear y Brager, 1998 y 2002). Por el contrario, la norma EN15251 utiliza datos del proyecto europeo SCAT, más directamente aplicable a Europa (Nicol y Humphreys, 2010). Por otro parte el software IESVE, utilizado para la evaluación del caso de estudio, permite seleccionar las cargas de ASHRAE en sus métodos de cálculo y parámetros de simulación, generando de esta manera un estándar único tanto en la creación de datos, como en la evaluación de resultados.

En lo que respecta a los requerimientos de aplicabilidad del método para la determinación de condiciones térmicas aceptables en espacios controlados por los ocupantes ASHRAE 55 -2017, el caso de estudio cumple con lo siguiente: ausencia de sistema de enfriamiento mecánico; los ocupantes representativos tienen tasas metabólicas entre los 1,0 y 1,3 MET, siendo libres de adaptar su ropa a condiciones térmicas inscritas en un rango de 0,5 a 1,0 clo y por último la temperatura exterior promedio prevaleciente es superior a 10 °C y menor a 33,5 °C.

Por otra parte, la metodología propuesta en esta investigación, establece un escenario climático, dado por un día representativo, dentro del periodo de verano. En dicho día se aplicarán los rangos de temperatura operativa aceptables para espacios acondicionados naturalmente, recomendado por ASHRAE 55 - 2017, y que se basa en la siguiente ecuación:

$$t_{\text{comf}} = 0,31 t_{\text{(pma(out))}} + 17,8 \quad \text{Ec. (3.1)}$$

Donde t_{comf} es la temperatura óptima para la comodidad y $t_{\text{pma(out)}}$ es la temperatura media del aire exterior prevaleciente. Una vez conocida la temperatura óptima de comodidad, se establece tanto un límite superior como inferior, generando una banda de confort de 7 °C para un 80% de aceptabilidad y de 5 °C para un 90% de aceptabilidad de los ocupantes satisfechos. En el caso del presente análisis, se consideró lo expuesto en el apéndice informativo J de ASHRAE 55 - 2017 que plantea aplicar para espacios naturalmente controlados por sus ocupantes, los límites de aceptabilidad del 80%, lo que se considera como aplicaciones típicas, a diferencia de emplear los límites de aceptabilidad del 90%, los cuales están dirigidos a un estándar más alto de confort térmico. Lo antes expuesto, lleva a asimilar el caso de estudio al límite de aceptabilidad de 80%, por tratarse de una vivienda donde los ocupantes cuentan con mayor libertad de controlar tanto aberturas como las condiciones de vestimenta y actividad.

Respecto a la temperatura promedio del aire exterior prevaleciente $t_{\text{pma(out)}}$, presente en la (ecuación 3.1), esta puede obtenerse, según ASHRAE 55, mediante los siguientes métodos:

- La media aritmética simple de todas las temperaturas medias diarias del aire exterior $t_{\text{dma(out)}}$, calculadas de 7 a 30 días consecutivos previos al día en cuestión.

- Las medias mensuales meteorológicas publicadas para cada mes calendario. Lo cual es recomendado para cuando los datos meteorológicos para calcular la temperatura del aire exterior promedio prevaeciente $t_{pma(out)}$. no están disponibles.

- El método exponencial $t_{pma(out)}$ que es una media móvil ponderada exponencialmente de una secuencia de temperaturas exteriores medias diarias antes del día en cuestión, donde los días en el pasado más remoto tienen menos influencia en la temperatura de confort de los ocupantes del edificio que los días más recientes (ecuación 3.2).

$$t_{pma(out)} = (1-\alpha) [t_e(d-1) + \alpha t_e(d-2) + \alpha^2 t_e(d-3) + \alpha^3 t_e(d-4) + \dots] \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde α es una constante entre 0 y 1 que controla la velocidad a la que la media de funcionamiento responde a los cambios en el clima (temperatura exterior). Los valores recomendados para α están entre 0,9 y 0,6, correspondientes a una media de respuesta lenta y rápida, respectivamente. En virtud de esto, la teoría del confort adaptativo sugiere que una media móvil de respuesta lenta ($\alpha = 0,9$) podría ser más apropiada para climas en los que la dinámica de la temperatura de escala sinóptica (día de hoy) es relativamente menor, como en los trópicos húmedos. Pero que, para climas de latitudes medias, donde las personas están más familiarizadas con la variabilidad del clima a escala sinóptica, un valor más bajo de α podría ser más apropiado ASAHRAE - 2017.

A lo recomendado por la norma ASHRAE 55, se suman investigaciones recientes que profundizan en la importancia de la aclimatación de las personas a la hora de juzgar las condiciones térmicas de su entorno. Peeters et al. (2009) en su análisis de confort térmico en edificios residenciales concluyen en la fuerte dependencia de los datos del clima, más específicamente de las temperaturas exteriores más recientes. Por otra parte, Humphreys et al. (2013), llegan a la conclusión que la media de funcionamiento es necesaria para la simulación térmica dinámica de las condiciones de confort, mientras que las medias mensuales históricas son valiosas para las evaluaciones de diseño iniciales. De Dear y Candido (2012) plantean que si bien, el confort térmico óptimo se desplaza en la dirección del clima al que hemos estado expuestos, cada nivel de adaptación climática posee su propio tiempo de exposición, por lo tanto, su determinación precisa, se torna compleja, pero necesaria para un análisis realista. Todo lo anterior, concuerda con la importancia de incorporar las temperaturas exteriores recientes en el análisis de

confort, sin embargo, aún no existe consenso en cuál de los métodos existentes es el más idóneo para establecerlas.

En el caso del escenario climático establecido para la evaluación, se consideró el día 17 de enero, el cual registra una temperatura máxima de 25 °C y un promedio diario de 18,2 °C, basándose en los datos del archivo climático, entregados por la estación meteorológica Carriel sur, para la ciudad de Concepción.

Por consiguiente, al aplicar la media mensual para el mes de enero, esta resulta ser de 17 °C. Mientras que si empleamos la media aritmética simple para los días anteriores próximos $t_{dma(out)}$ ésta resulta de: 16,7 °C para 30 días; 17 °C para 20 días y finalmente 18 °C para 7 días. Ahora bien, al utilizar la media móvil exponencial $t_{pma(out)}$ (ecuación 3.2), considerando un valor $\alpha = 0,6$ resultan: 18,6 °C para 30 días; 18,6 °C para 20 días y 18,1 °C para 7 días. Cabe señalar que para el cálculo del $t_{pma(out)}$ se consideró un valor de α bajo, ya que la ciudad de Concepción pertenece a la categoría de latitudes medias, según la recomendación de ASHRAE 55, lo que difiere de los casos en climas tropicales donde se aplicaron valores de α más altos.

Finalmente, para enriquecer el análisis, se utilizó la temperatura media exterior de funcionamiento o running mean, utilizada por EN 15251 - 2007 para establecer la temperatura exponencialmente ponderada del aire exterior (ecuación 3.3). Dicho método se aplicó a un rango de 7 días, en acuerdo con lo desarrollado por Pérez et al (2018) para un análisis de viviendas en la ciudad de Concepción, Chile.

$$\Theta_{rm} = (\Theta_{(ed-1)} + 0,8 \Theta_{(ed-2)} + 0,6 \Theta_{(ed-3)} + 0,5 \Theta_{(ed-4)} + 0,4 \Theta_{(ed-5)} + 0,3 \Theta_{(ed-6)} + 0,2 \Theta_{(ed-7)}) / 3,8 \quad \text{Ec. 3.3}$$

Donde $\theta_{(ed-1)}$ es la temperatura exterior diaria promedio del día anterior; $\theta_{(ed-2)}$ es la temperatura exterior promedio del día anterior y así sucesivamente, hasta cubrir los siete días anteriores. De esta forma, tras aplicar esta ecuación, se obtuvo una temperatura media exterior de funcionamiento de 18,4 °C, para el día en análisis. Este último valor permitió visualizar resultados comunes de temperaturas para los días cercanos al día en analizado, a diferencia de los días más remotos, particularmente en los promedios aritméticos a 20 y 30 días. De esta manera se concluye que la evaluación a los 7 días representa los valores más coherentes entre sí, para los distintos métodos (tabla 3.1), así como también el rango de días más abarcable por la memoria térmica de las personas, para el día analizado. Dejando

finalmente un valor cerrado de temperatura de 18 °C, dada la tendencia del análisis, como variable de entrada a la ecuación de confort adaptativo para el caso de estudio.

Tabla 3.1: Resumen cálculo de temperatura del aire exterior prevaleciente, tomando como escenario climático el día 17 de enero.

	Método			Media mensual enero
	Media aritmética simple para los días anteriores próximos	Media móvil exponencial	Temperatura media exterior de funcionamiento o running mean (ecuación 3.3)	
	$t_{dma}(out)$	$t_{pma}(out)$ (ecuación 3.2)		
30 días	16,7 °C	18,6 °C	-	17° C
20 días	17 °C	18,6 °C	-	
7 días	18 °C	18,1 °C	18,4 °C	

3.5 Selección del dispositivo de ventilación (torre de viento comercial)

La torre de viento considerada para la evaluación del caso de estudio, deberá corresponder a un sistema de ventilación natural pasiva, en acuerdo a los principios profundizados en el punto 2.3 de la presente tesis. Dicho dispositivo deberá ser producible en serie y comercializable, con objeto de que pueda ser adaptado en un plazo acotado a las condiciones que presente el lugar de estudio. Por otra parte, deberá contar con un seguimiento científico, que no solo aporte en constatar su desempeño, sino que sea parte de su desarrollo y evolución como sistema de ventilación.

Dentro de las torres de viento modernas descritas en el punto 2.3.2, se mencionaron dos sistemas de ventilación natural comerciales: WindcatcherTM, correspondiente a la firma Monodraught Ltd. y Windvent, perteneciente a Midtherm Engineering Ltd. Siendo seleccionada para efectos de análisis de esta tesis, el sistema WindcatcherTM, de aquí en adelante “windcatcher”, ya que cuenta con el respaldo científico a través de investigaciones centradas en su desempeño (Elmualim y Awbi, 2002; Elmualim, 2006 c; Liu y Mak, 2007; Jones et al. 2008; Su et al. 2008; Elizalde y Mumovic, 2008; Jones y Kirby, 2009; Mavrogianni y Mumovic, 2010; Ji et al. 2012; Jomehzadeh et al. 2017). Por otra parte, Monodraught en un proyecto colaborativo con el software IES, desarrolló las modelaciones de sus windcatchers. Lo cual simplifica el proceso de modelado del sistema, ya que se disminuyen los errores en la elaboración de los componentes geométricos, permitiendo a proyectistas e investigadores, centrarse en el funcionamiento y el desempeño del dispositivo.

3.6 Esquemas metodología

3.6.1 Esquema general de la metodología propuesta para la investigación

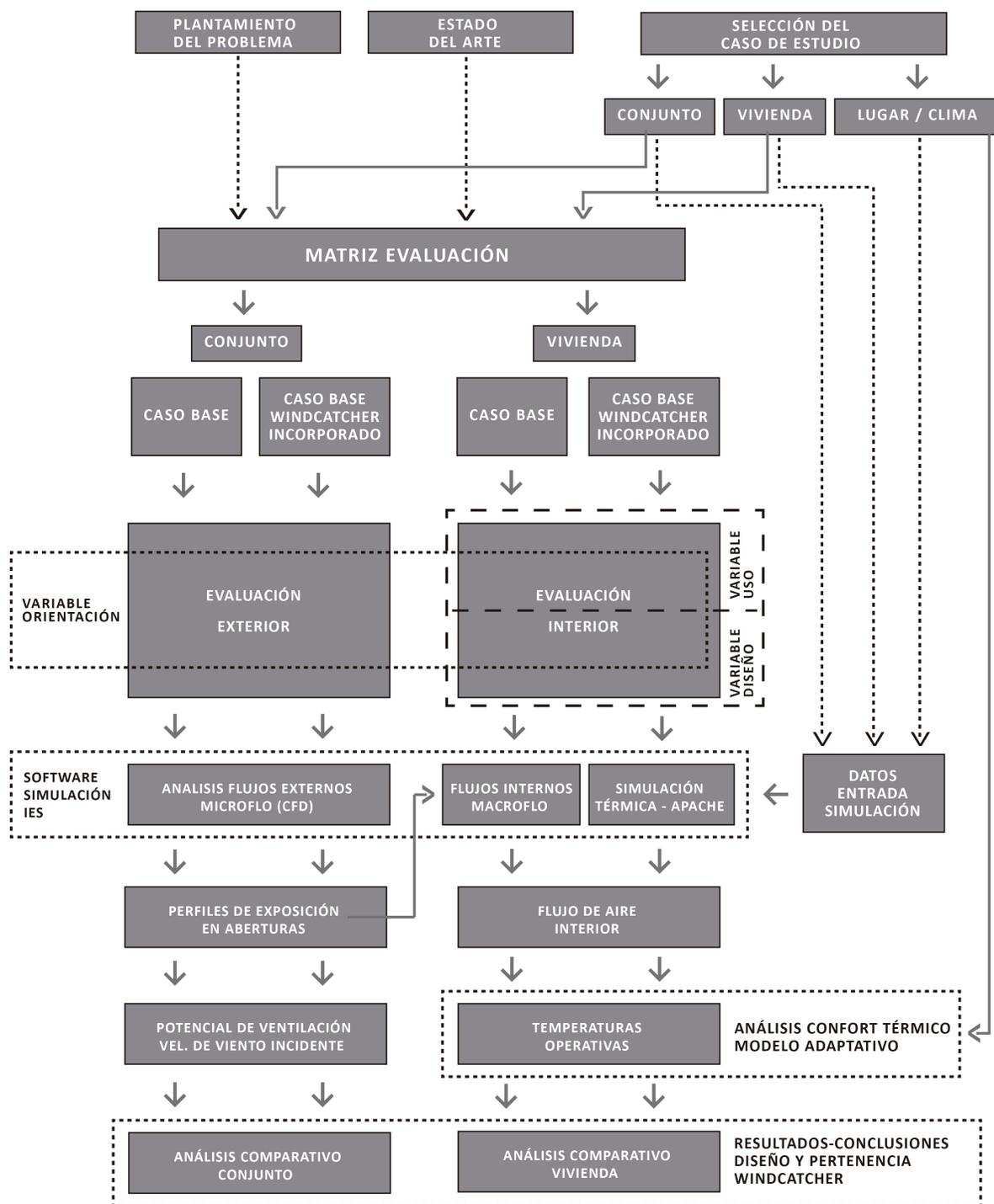


Figura 3.1: Esquema general de la metodología propuesta para la investigación.

Evaluación de estrategias de ventilación natural basadas en la integración de torres de viento al diseño arquitectónico de viviendas en climas templados.

3.6.2 Esquema matriz evaluación externa

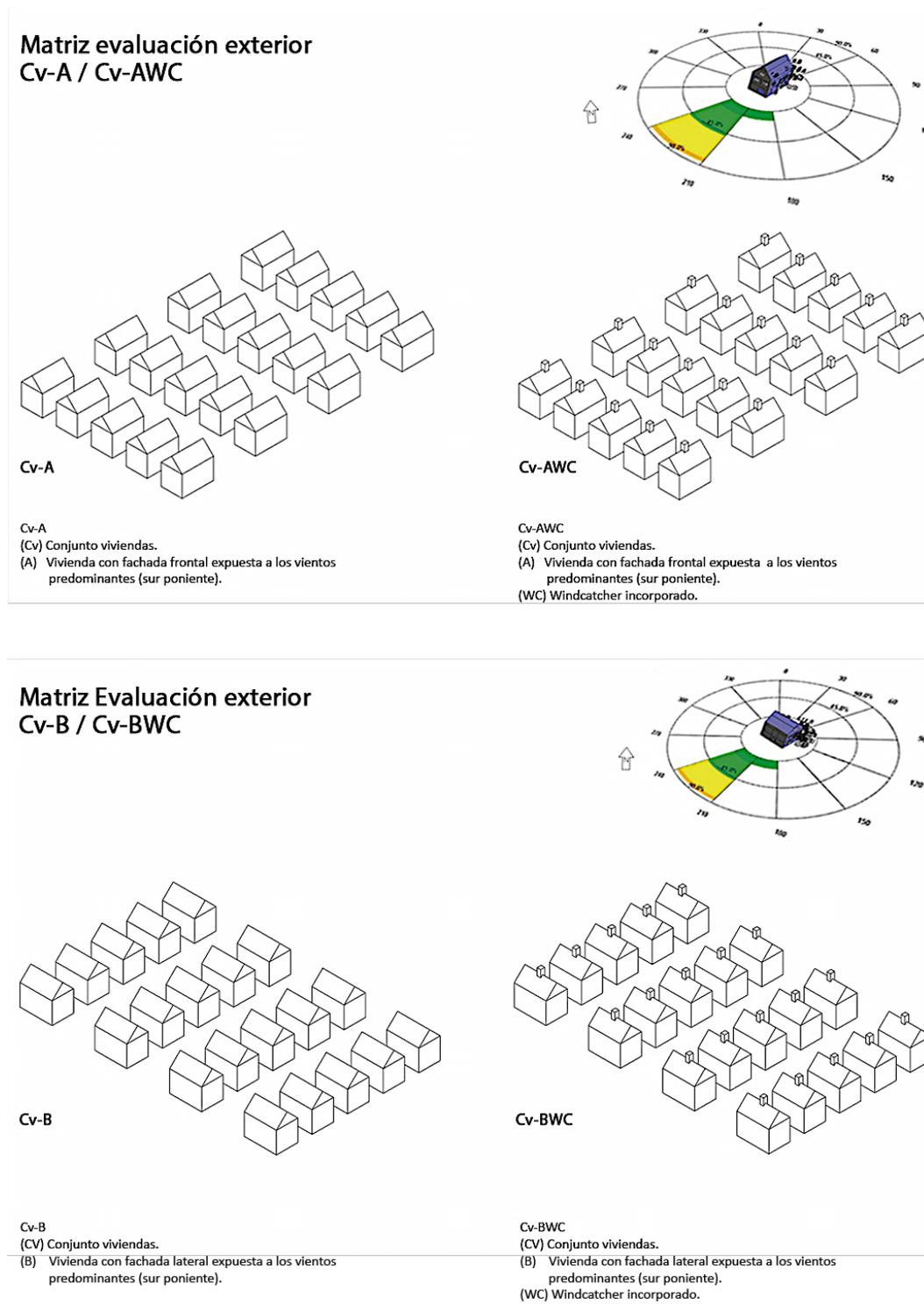
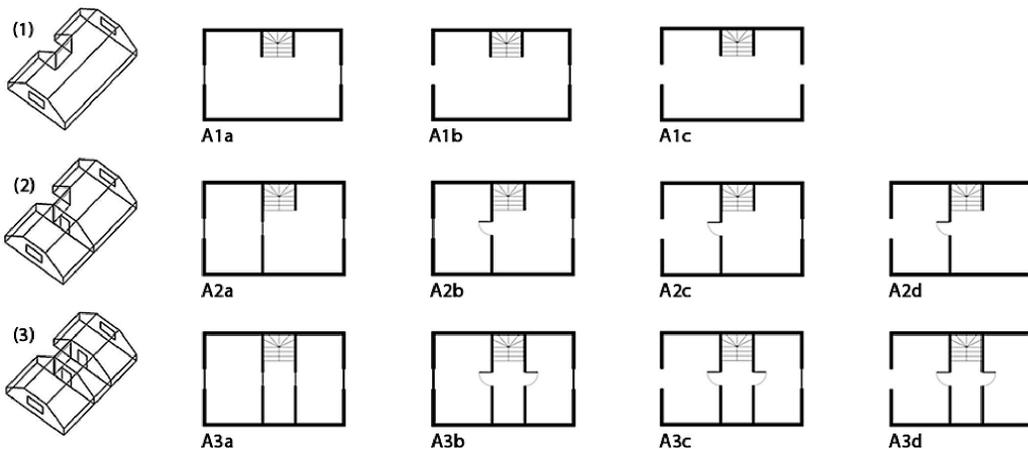
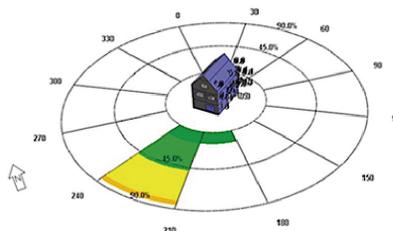
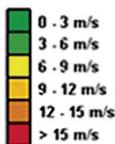


Figura 3.2: Esquema matriz evaluación exterior, para el conjunto de viviendas.

3.6.3 Esquema matriz evaluación interna



Matriz evaluación interior (A) viento frontal



A1a
(A) Vivienda con fachada frontal expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
(1) Ático como un recinto único.
(a) Ventana frontal (sur poniente) cerrada.
Ventana posterior (nororienté) cerrada.

A1b
(A) Vivienda con fachada frontal expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
(1) Ático como un recinto único.
(b) Ventana frontal (sur poniente) abierta.
Ventana posterior (nororienté) cerrada.

A1c
(A) Vivienda con fachada frontal expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
(1) Ático como un recinto único.
(c) Ventana frontal (sur poniente) abierta.
Ventana posterior (nororienté) abierta.

A2a
(A) Vivienda con fachada frontal expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
(2) Ático dividido en un dormitorio y un estar.
(a) Ventana frontal (sur poniente) cerrada.
Ventana posterior (nororienté) cerrada.
Puerta cerrada.

A2b
(A) Vivienda con fachada frontal expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
(2) Ático dividido en un dormitorio y un estar.
(b) Ventana frontal (sur poniente) cerrada.
Ventana posterior (nororienté) cerrada.
Puerta abierta.

A2c
(A) Vivienda con fachada frontal expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
(2) Ático dividido en un dormitorio y un estar.
(c) Ventana frontal (sur poniente) abierta.
Ventana posterior (nororienté) cerrada.
Puerta abierta.

A2d
(A) Vivienda con fachada frontal expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
(2) Ático dividido en un dormitorio y un estar.
(d) Ventana frontal (sur poniente) abierta.
Ventana posterior (nororienté) abierta.
Puerta abierta.

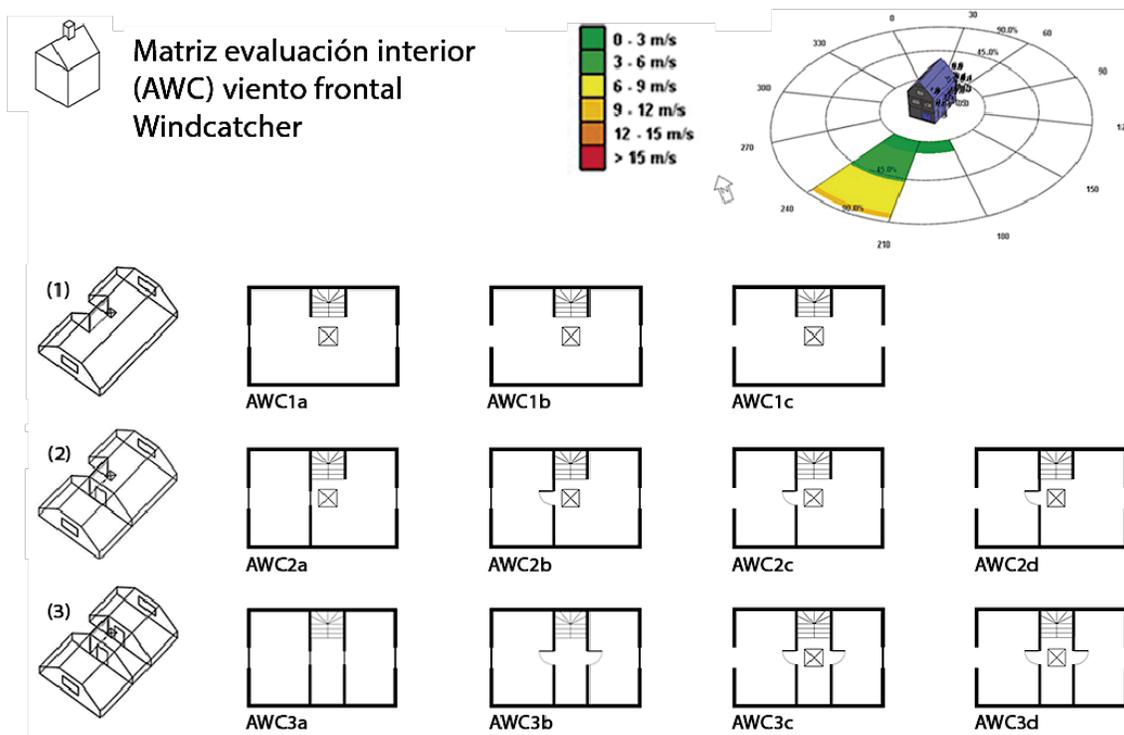
A3a
(A) Vivienda con fachada frontal expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
(3) Ático dividido en dormitorio 1, estar y dormitorio 2
(a) Ventana frontal (sur poniente) cerrada.
Ventana posterior (nororienté) cerrada.
Puertas cerradas.

A3b
(A) Vivienda con fachada frontal expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
(3) Ático dividido en dormitorio 1, estar y dormitorio 2.
(b) Ventana frontal (sur poniente) cerrada.
Ventana posterior (nororienté) cerrada.
Puertas abiertas.

A3c
(A) Vivienda con fachada frontal expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
(3) Ático dividido en dormitorio 1, estar y dormitorio 2.
(c) Ventana frontal (sur poniente) abierta.
Ventana posterior (nororienté) cerrada.
Puertas abiertas.

A3d
(A) Vivienda con fachada frontal expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
(3) Ático dividido en dormitorio 1, estar y dormitorio 2.
(d) Ventana frontal (sur poniente) abierta.
Ventana posterior (nororienté) abierta.
Puertas abiertas.

Figura 3.3: Esquema matriz evaluación interior, vivienda orientada de forma frontal a los vientos.



AWC1a
 (A) Vivienda con fachada frontal expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
 (WC) Windcatcher incorporado.
 (1) Ático como un recinto único.
 (a) Ventana frontal (sur poniente) cerrada.
 Ventana posterior (nororientado) cerrada.

AWC1b
 (A) Vivienda con fachada frontal expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
 (WC) Windcatcher incorporado.
 (1) Ático como un recinto único.
 (b) Ventana frontal (sur poniente) abierta.
 Ventana posterior (nororientado) cerrada.

AWC1c
 (A) Vivienda con fachada frontal expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
 (WC) Windcatcher incorporado.
 (1) Ático como un recinto único.
 (c) Ventana frontal (sur poniente) abierta.
 Ventana posterior (nororientado) abierta.

AWC2a
 (A) Vivienda con fachada frontal expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
 (WC) Windcatcher incorporado.
 (2) Ático dividido en un dormitorio y un estar.
 (a) Ventana frontal (sur poniente) cerrada.
 Ventana posterior (nororientado) cerrada.
 Puerta cerrada.

AWC2b
 (A) Vivienda con fachada frontal expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
 (WC) Windcatcher incorporado.
 (2) Ático dividido en un dormitorio y un estar.
 (b) Ventana frontal (sur poniente) cerrada.
 Ventana posterior (nororientado) cerrada.
 Puerta abierta.

AWC2c
 (A) Vivienda con fachada frontal expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
 (WC) Windcatcher incorporado.
 (2) Ático dividido en un dormitorio y un estar.
 (c) Ventana frontal (sur poniente) abierta.
 Ventana posterior (nororientado) cerrada.
 Puerta abierta.

AWC2d
 (A) Vivienda con fachada frontal expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
 (WC) Windcatcher incorporado.
 (2) Ático dividido en un dormitorio y un estar.
 (d) Ventana frontal (sur poniente) abierta.
 Ventana posterior (nororientado) abierta.
 Puerta abierta.

AWC3a
 (A) Vivienda con fachada frontal expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
 (WC) Windcatcher incorporado.
 (3) Ático dividido en dormitorio 1, estar y dormitorio 2
 (a) Ventana frontal (sur poniente) cerrada.
 Ventana posterior (nororientado) cerrada.
 Puertas cerradas.

AWC3b
 (A) Vivienda con fachada frontal expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
 (WC) Windcatcher incorporado.
 (3) Ático dividido en dormitorio 1, estar y dormitorio 2
 (b) Ventana frontal (sur poniente) cerrada.
 Ventana posterior (nororientado) cerrada.
 Puertas abiertas.

AWC3c
 (A) Vivienda con fachada frontal expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
 (WC) Windcatcher incorporado.
 (3) Ático dividido en dormitorio 1, estar y dormitorio 2
 (c) Ventana frontal (sur poniente) abierta.
 Ventana posterior (nororientado) cerrada.
 Puertas abiertas.

AWC3d
 (A) Vivienda con fachada frontal expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
 (WC) Windcatcher incorporado.
 (3) Ático dividido en dormitorio 1, estar y dormitorio 2
 (d) Ventana frontal (sur poniente) abierta.
 Ventana posterior (nororientado) abierta.
 Puertas abiertas.

Figura 3.4: Esquema matriz evaluación interior, vivienda con Windcatcher incorporado, orientada de forma frontal a los vientos.

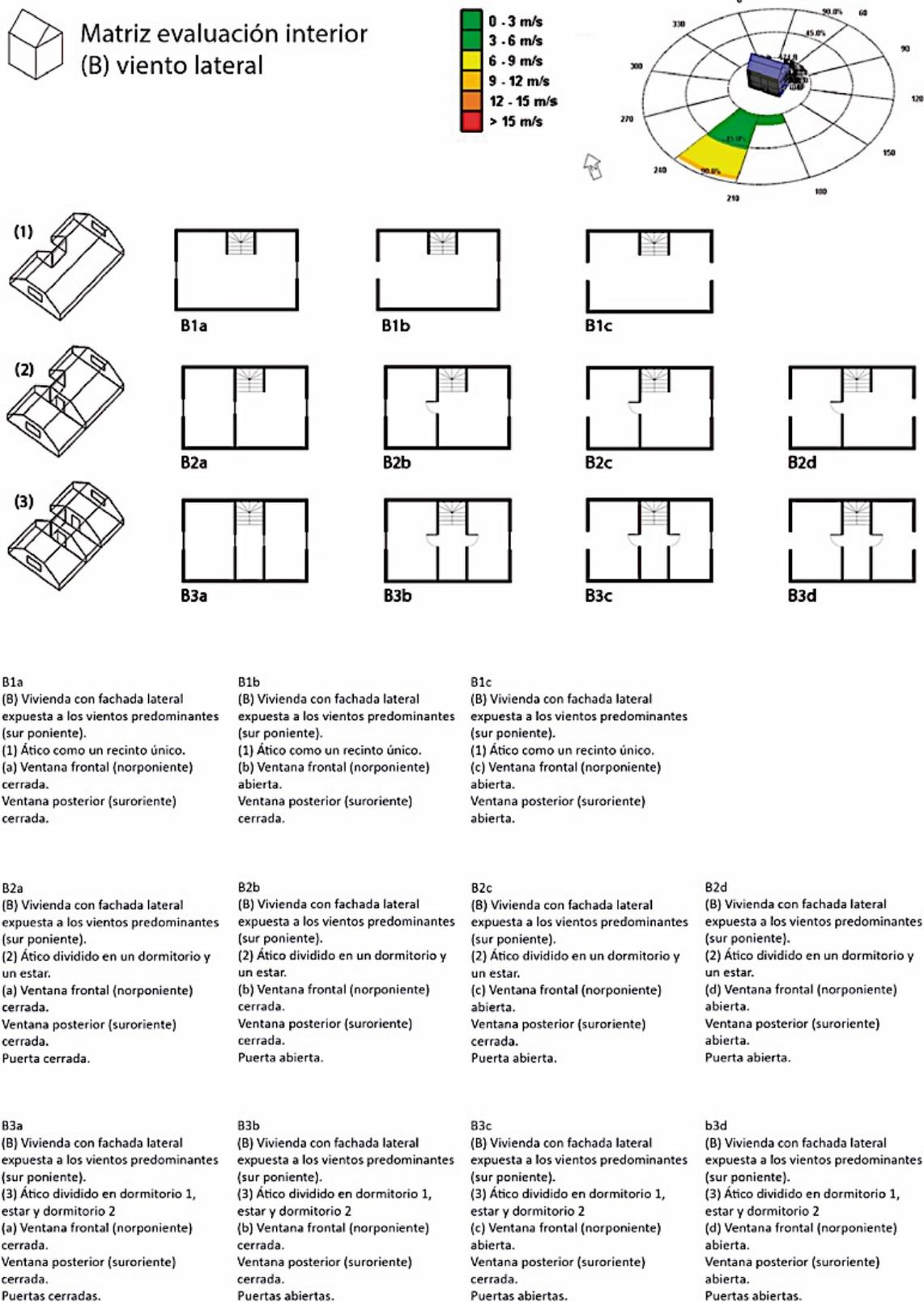
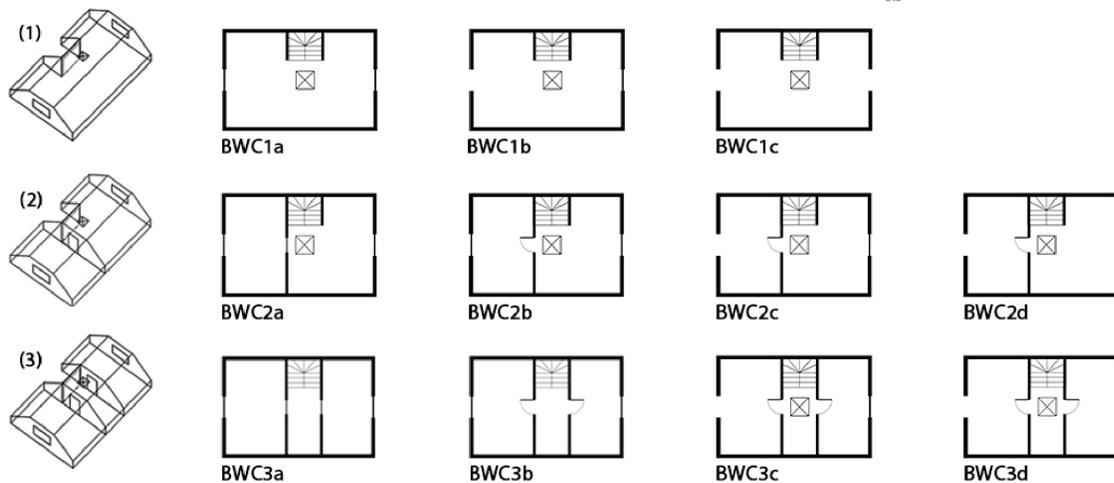
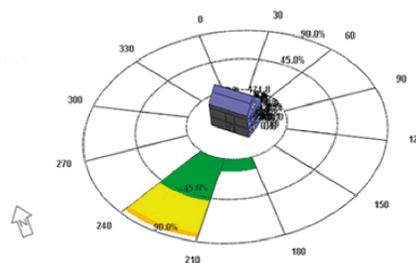
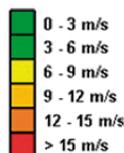


Figura 3.5: Esquema matriz evaluación interior, vivienda orientada de forma lateral a los vientos.



Matriz evaluación interior (BWC) viento lateral Windcatcher



BWC1a
 (B) Vivienda con fachada lateral expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
 (WC) Windcatcher incorporado
 (1) Ático como un recinto único.
 (a) Ventana frontal (norponiente) cerrada.
 Ventana posterior (suroriente) cerrada.

BWC1b
 (B) Vivienda con fachada lateral expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
 (WC) Windcatcher incorporado
 (1) Ático como un recinto único.
 (b) Ventana frontal (norponiente) abierta.
 Ventana posterior (suroriente) cerrada.

BWC1c
 (B) Vivienda con fachada lateral expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
 (WC) Windcatcher incorporado
 (1) Ático como un recinto único.
 (c) Ventana frontal (norponiente) abierta.
 Ventana posterior (suroriente) abierta.

BWC2a
 (B) Vivienda con fachada lateral expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
 (WC) Windcatcher incorporado
 (2) Ático dividido en un dormitorio y un estar.
 (a) Ventana frontal (norponiente) cerrada.
 Ventana posterior (suroriente) cerrada.
 Puerta cerrada.

BWC2b
 (B) Vivienda con fachada lateral expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
 (WC) Windcatcher incorporado
 (2) Ático dividido en un dormitorio y un estar.
 (b) Ventana frontal (norponiente) cerrada.
 Ventana posterior (suroriente) cerrada.
 Puerta abierta.

BWC2c
 (B) Vivienda con fachada lateral expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
 (WC) Windcatcher incorporado
 (2) Ático dividido en un dormitorio y un estar.
 (c) Ventana frontal (norponiente) abierta.
 Ventana posterior (suroriente) cerrada.
 Puerta abierta.

BWC2d
 (B) Vivienda con fachada lateral expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
 (WC) Windcatcher incorporado
 (2) Ático dividido en un dormitorio y un estar.
 (d) Ventana frontal (norponiente) abierta.
 Ventana posterior (suroriente) abierta.
 Puerta abierta.

BWC3a
 (B) Vivienda con fachada lateral expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
 (WC) Windcatcher incorporado
 (3) Ático dividido en dormitorio 1, estar y dormitorio 2
 (a) Ventana frontal (norponiente) cerrada.
 Ventana posterior (suroriente) cerrada.
 Puertas cerradas.

BWC3b
 (B) Vivienda con fachada lateral expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
 (WC) Windcatcher incorporado
 (3) Ático dividido en dormitorio 1, estar y dormitorio 2
 (b) Ventana frontal (norponiente) cerrada.
 Ventana posterior (suroriente) cerrada.
 Puertas abiertas.

BWC3c
 (B) Vivienda con fachada lateral expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
 (WC) Windcatcher incorporado
 (3) Ático dividido en dormitorio 1, estar y dormitorio 2
 (c) Ventana frontal (norponiente) abierta.
 Ventana posterior (suroriente) cerrada.
 Puertas abiertas.

BWC3d
 (B) Vivienda con fachada lateral expuesta a los vientos predominantes (sur poniente).
 (WC) Windcatcher incorporado
 (3) Ático dividido en dormitorio 1, estar y dormitorio 2
 (d) Ventana frontal (norponiente) abierta.
 Ventana posterior (suroriente) abierta.
 Puertas abiertas.

Figura 3.6: Esquema matriz evaluación interior, vivienda con Windcatcher incorporado, orientada de forma lateral a los vientos.

Capítulo 4

Definición del caso de estudio

“Selección de una tipología de vivienda representativa, expuesta a sobrecalentamiento, como caso de estudio”

Este capítulo se centra en la definición de un caso de estudio que permita contextualizar la aplicación del windcatcher como solución al sobrecalentamiento de viviendas en las estaciones cálidas. Para ello es necesario contar con una localidad que cuente con un régimen de vientos que ofrezca un motor natural para llevar a cabo estrategias de ventilación. Bajo esta lógica se estableció como lugar de análisis la ciudad de Concepción, la cual posee las condiciones antes descritas y por consiguiente la posibilidad de contar con respuestas pasivas a problemas de confort al interior de las edificaciones, principalmente en verano. De esta manera se realizará una caracterización de las condiciones climáticas, geográficas y urbanísticas, para situarse en un modelo de vivienda que represente y abarque las circunstancias que facilitan el sobrecalentamiento y a su vez presenten la oportunidad de aplicar estrategias de ventilación natural a través del windcatcher.

4.1 Lugar de estudio

4.1.1 Condiciones geográficas y caracterización climáticas

La ciudad de Concepción, localizada a 36° 50' de latitud Sur y 73° 02' de longitud Oeste, es la capital de la provincia del mismo nombre y de la región del Biobío (Figura 4.1). Como núcleo urbano, forma parte del área metropolitana de Concepción (AMC) conformado por las comunas de Concepción, Chiguayante, Penco, San Pedro de la Paz, Hualpén y Talcahuano. Dicha conurbación es la segunda más poblada de Chile (INE, 2002) y representa un polo de atracción industrial.



Figura 4.1: A la izquierda, la ubicación de la región del Biobío en el territorio chileno. Al centro, la comuna de Concepción dentro de la región del Biobío. A la derecha, el polígono que configura la comuna de Concepción

Geográficamente la ciudad de Concepción se ubica a los pies de la cordillera de la Costa, precisamente en el valle de la Mocha, a una altitud de 12 m.s.n.m., en un área que se extiende entre el río Biobío y el río Andalién, contando con accidentes geográficos como lagunas, humedales y cordones montañosos.

El clima de Concepción corresponde a una transición entre el clima mediterráneo y el templado húmedo con influencia oceánica. De acuerdo a la NCh 1079-2008, Concepción se sitúa en la zona “sur litoral”, respecto a la zonificación climática habitacional para Chile. Con una temperatura media anual de 12,2°C; una temperatura máxima media de 22,8°C, registrada en el mes de enero, y una temperatura mínima media de 5,6°C, registrada en los meses de agosto y septiembre. La humedad relativa media anual es 82%, mientras que la radiación global media anual es de 4161 Wh/m², con una radiación global media mensual máxima de 6946 Wh/m², registrada en el mes de enero.

Los vientos, por su parte, registran una intensidad media anual 6,7 m/s, con una dirección predominante suroeste. El régimen de vientos a lo largo del año se caracteriza por vientos provenientes del norte, los meses de mayo a julio, lo cual trae consigo frentes de mal tiempo, que incluye cielos nublados, vientos y lluvia. Para el resto de los meses del año, la dirección predominante es la suroeste, asociado a cielos que van de parcialmente nublados a despejados. Respecto a los meses de verano, estos registran intensidades medias de viento de: 7,2 m/s, dirección suroeste en diciembre; 7,7 m/s, dirección suroeste, en enero; 7,2 m/s, dirección suroeste, febrero y 6,2 m/s, dirección suroeste, para marzo (NCh 1079-

2008). Además, dichos vientos disminuyen su intensidad en la noche, generando máximas en las horas de la tarde. De esta manera Concepción cuenta a partir de sus condiciones de viento con un potencial agente de refrigeración y ventilación (**Figura 4.1**), lo cual se torna de gran valor, dadas las temperaturas registradas para el verano, las cuales eventualmente superan los 30°C en el mes de enero, según los datos de la dirección meteorológica de Chile.

Ciudad Estación	Parámetros climáticos	Enero	Junio	M e d i a Anual	Potencial de la Ventilación		
					Efecto viento	Efecto stack	Enfriamiento
Iquique Diego Aracena	T. media máxima, °C	24,9	19,0	21,3	M	B	B
	T. media mín. °C	17,6	13,5	15,1			
	T. media, °C	21,1	15,9	18,0			
	Direc. y Vel.media, m/s	SW 3,1	SW 3,1	SW 3,1			
	Rad.Glob. mensual,MJ/m ²	727,8	313,6	6240,4			
Copiapó Chamonte	T. media máxima, °C	28,1	20,0	23,9	A	M	B
	T. media mínima, °C	13,3	5,9	9,3			
	T. media, °C	19,6	11,4	15,2			
	Direc. y Vel.media, m/s	W 6,2	W 4,1	W 5,1			
	Rad. Glob. mensual,MJ/m ²	761,9	314,1	6702,0			
Santiago Quinta Normal	T. media máxima, °C	29,7	15,2	22,5	B	M	B
	T. media mínima, °C	13,0	4,3	8,3			
	T. media, °C	20,9	8,5	14,4			
	Direc. y vel.media, m/s	SW 2,6	Calma	SW 2,1			
	Rad. Glob. mensual,WJ/m ²	715,1	142,3	5062,0			
Concepción Carriel Sur	T. media máxima, °C	22,8	13,4	17,7	A	A	A
	T. media mínima, °C	10,5	6,2	7,7			
	T. media, °C	16,3	9,2	12,2			
	Direc. y vel.media, m/s	SW 7,7	N 8,2	SW 6,7			
	Rad. Glob. mensual,WJ/m ²	761,8	142,1	5422,9			
Punta Arenas Pdte. Ibañez	T. media máxima, °C	14,7	4,2	9,7	A	A	A
	T. media mínima, °C	6,5	-0,7	2,8			
	T. media, °C	10,5	1,5	5,9			
	Direc. y vel.media, m/s	W 9,3	W 6,7	W 8,2			
	Rad. Glob. mensual,MJ/m ²	575,3	47,1	3634,9			

Figura 4.2: Datos climáticos de algunas localidades de Chile. Antecedentes respecto del potencial para refrigerar y ventilar que ofrece el ambiente natural de las localidades y principios de ventilación más recomendados: alto (A); mediano (M) y bajo (B) [Fuente: Geeduc, 2012]

4.1.2 Contexto urbano y edificatorio

El contexto urbano y edificatorio de la ciudad de Concepción esta dictado por el Plan Regulador Comunal de Concepción (PRCC) el cual establece las normas referentes a límite urbano, zonificación, usos del

suelo, condiciones de subdivisión predial, edificación, urbanización y vialidad. Todo lo cual opera de acuerdo con lo dispuesto en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (O. G. U. C.) y el Plan Regulador Metropolitano de Concepción (PRMC), que actúa como instrumento de planificación territorial para 11 comunas de la provincia de Concepción.

En lo que se refiere al desarrollo urbano de la comuna de Concepción, los planes reguladores proyectados han tenido que lidiar con un territorio marcado por hitos naturales, lo cual se conjuga con el desarrollo de las actividades que presentan una mayor dinámica de crecimiento, tales como son las productivas y residenciales. A esto se suma la evolución de las comunas contiguas que forman parte de la conurbación, lo cual le asigna a la comuna de Concepción un rol de núcleo metropolitano. Por otro lado, Concepción no ha escapado de fenómenos globales como la consideración de políticas de neoliberales en sus instrumentos de planificación. Esto último, se hace patente en el plan regulador del año 82, que propuso un marco normativo de carácter flexible, en donde la participación del mercado se contempló como motor del desarrollo urbano. Esta tendencia también ha formado parte de los planes reguladores de las áreas metropolitana, como es el caso del “gran Concepción”, influyendo en los patrones de expansión de los centros urbanos. Bajo esta línea Baeriswyl (2009) plantea al Gran Concepción como un modelo de crecimiento asociado al consumo de suelo, que muestra un fuerte componente centrifugal, con el centro de su fuerza fijado en la comuna de Concepción. Lo cual es coincidente con lo expuesto por Hidalgo et al, (2008) que observa una expansión de los condominios cerrados, en su mayoría distantes del centro urbano, así como una producción de grandes torres en altura al interior de los núcleos urbanos.

En el caso específico de la comuna de Concepción, como el uso del suelo en el núcleo central de la ciudad está dirigido a proyectos residenciales de alta densidad, representados principalmente por edificios en altura, el valor del suelo ha aumentado considerablemente. Lo cual trajo como consecuencia que las iniciativas inmobiliarias que buscan responder al modelo de vivienda tradicional con patio, se manifestaran a través de proyectos de condominios horizontales, emplazados en las áreas periféricas al centro, correspondientes a las zonas habitacionales de expansión definidas por el plan regulador. Referente a esto Pérez et al. (2008) identificó en la comuna de Concepción a los sectores de Lomas de San Andrés, Lomas de San Sebastián y Lomas de Bellavista como zonas de propagación de loteos y barrios cerrados, los cuales apuntan a sectores de población media y media alta (Figura 4.2).



Figura 4.3: Crecimiento de loteos de viviendas en la zona del valle de Andalién, una de las zonas que ha sufrido mayor expansión en la comuna de Concepción. A la izquierda la situación en el año 2008, mientras que a la derecha se aprecia su estado al 2018. (Fuente Google Earth. Observado el 5 de septiembre del 2018)

En este contexto, un nuevo paisaje urbano representado por condominios y urbanizaciones cerradas comienza a consolidarse en la periferia de la ciudad, generando barrios a partir de proyectos inmobiliarios gestados fundamentalmente por privados. En el caso del área metropolitana de Concepción, estos nuevos barrios comienzan a formarse en torno a la infraestructura vial que une distintos puntos de la conurbación. La cual, según Pérez y Salinas (2007) presenta un modelo de expansión urbana en forma tentacular con tendencia a la dispersión-concentración.

El modelo de condominio desarrollado en la comuna de Concepción responde según la caracterización expuesta por Hidalgo et al. (2003) a la tipología de “viviendas unifamiliares en copropiedad”, las cuales están amparadas bajo la Ley 19.537 de Copropiedad Inmobiliaria del año 1997. Estas pueden ir desde un pequeño número de viviendas, hasta cerca de un centenar de unidades, contando en su mayoría con perímetro cerrado, acceso controlado y vigilancia permanente o semipermanente. En el año 2008, Hidalgo et al. (2003) precisan que estos condominios como oferta están dirigidos a grupos socioeconómicos medios, medios altos y altos, que migran hacia los límites de las comunas, en búsqueda de nuevos espacios de mayor tamaño. Por otra parte, estas urbanizaciones comienzan nutrirse con equipamientos que apoyen las necesidades de sus habitantes, sin embargo, estas generalmente no cubren o no están a la altura de las demandas de los moradores, como son las instituciones educacionales, centros comerciales y sus propios empleos, debiendo los residentes de estos barrios

trasladarse diariamente al centro de la ciudad. Lo que en definitiva favorece el efecto de ciudades dormitorio, amplificando el resguardo y las medidas de seguridad a través de muros, alarmas y guardias.

4.2 Selección del caso de estudio

4.2.1 Condiciones de interés para el caso de estudio

Tomando como punto de partida la problemática de sobrecalentamiento que experimentan las viviendas en sus áticos o pisos superiores, se asumen restricciones a la hora de establecer el universo de estudio dentro de la comuna de Concepción. La primera condición guarda relación con que deben ser viviendas que presenten bajas oportunidades de ventilación natural a través de sus fachadas, lo cual puede darse por obstrucción de edificaciones aledañas o bien unidades de igual tipología, que por efecto de proximidad no permitan el aprovechamiento de los flujos de aire exterior. La otra condición necesaria a considerar es la posibilidad de contar con un Windcatcher como estrategia de ventilación natural, lo cual deja fuera en primera instancia a las edificaciones en altura, por la dificultad de integrar a los pisos inferiores, los flujos de entrada y salida de aire necesarios para el funcionamiento del sistema. Así como también se excluirían las viviendas sociales, ya que el costo de implantar un sistema de windcatcher escapa del presupuesto asignado para estos proyectos habitacionales. De esta manera se acota el universo de estudio a las tipologías de viviendas que estén inmersas en conjuntos de alta o media densidad, que por lo mismo cuenten con dificultad de ventilación, así como también que se sitúen en sectores de ingresos de clase media y media alta.

Según lo planteado en el punto referido al contexto urbano y edificatorio de la comuna de Concepción, los nuevos proyectos residenciales responden principalmente a condominios emplazados en la zona periurbana de la comuna. Dichos proyectos responden a fórmulas de mercado, llevadas a cabo por la empresa inmobiliaria, lo cual implica tipologías de viviendas aisladas o bien adosadas, desarrolladas en 2 pisos o 2 pisos más ático. Generando como conjunto lo que Pérez et al. (2008) definieron como paisajes de la repetición, los cuales se caracterizan por tener una gran superficie, ocupar una gran cantidad de terreno y una baja densidad residencial, así como a la vez cuentan con una gran cantidad de lotes con viviendas iguales o muy parecidas entre sí, lo cual provoca la desorientación del observador, debido a la falta de referentes y homogeneidad en el paisaje.

Finalmente es posible encontrar representado el caso de estudio en la vivienda desarrollada como unidad del modelo de condominio o proyectos de viviendas en construcción simultánea, ya que éstas reúnen las condiciones planteadas como problemática de investigación.

4.2.2 Análisis de representatividad del caso de estudio

Con el fin de determinar si el caso de estudio establecido constituye una tendencia en el parque residencial, se realizó un análisis de representatividad a partir de las bases de datos de la Dirección de Obras de la Municipalidad de Concepción, en adelante D.O.M. El periodo de análisis fue establecido desde el año 2005 (fecha de promulgación del plan regulador vigente de la comunal de Concepción) al 13 de junio del año 2018, que es la fecha en que se llevó a cabo el análisis. Para esto se utilizó una herramienta de Sistemas de Información Geográfica (SIG), la cual, mediante su capacidad para integrar capas de datos referenciados geográficamente, logró determinar el porcentaje de cobertura de la tipología seleccionada.

Para llevar a cabo el análisis se desarrolló la siguiente metodología:

- Análisis visual a través de Google Earth y verificación en terreno para detectar tipologías de conjuntos habitacionales que cumplan con el perfil del caso de estudio.
- Recopilación de planimetría y especificaciones técnicas de los conjuntos en el archivo de la D.O.M
- Definición de polígonos en formato KMZ en base al análisis anterior. (Figura 4.4).
- Recopilación de datos de permisos de edificación (base de datos de la D.O.M.).
- Análisis de datos en el software de Información geográfica ArqGIS, a partir de los permisos de edificación existentes en la D.O.M.

Para este último procedimiento, con el fin de poder determinar el porcentaje que la tipología seleccionada representa respecto al total de las viviendas con permiso y recepción Municipal, construidas en la comuna en el período a analizar, se filtraron en la base de datos aquellas unidades que cumplan con los siguientes parámetros:

- Edificaciones con destino residencial.
- Permisos correspondientes a loteos, leyes de piso horizontales, y unidades independientes, descartando todas las unidades correspondientes a leyes de piso verticales (edificios en altura)
- Permisos de edificación de obras a partir del año 2005 en adelante (fecha de promulgación del Plan Regulador Comunal de Concepción)
- Permisos de edificación de obra nueva (no se consideran permisos de obra menor)
- Obras con recepción (se descartan permisos ingresados que no cuentan con recepción, dado que a su ejecución no se puede verificar)
- Superficie de obra en el rango de 70 a 140 m² (acotar al segmento de ingresos contemplado)
- Viviendas inscritas como DFL 2 (franquicia tributaria a la que se acogen las viviendas con superficie construida menor a 140 m²)
- Se descartaron leyes especiales (Ley del mono, zona declarada afectada catástrofes)

Al filtrar estos parámetros en la base de datos para toda la comuna de Concepción, se determinó que en el período analizado se recibieron un total de 3609 unidades que cumplían los requisitos mencionados. Luego se aplicaron los mismos parámetros de filtro a los polígonos en los que se identificó la tipología a analizar, resultando 2857 unidades. Lo anterior permite concluir que las viviendas pertenecientes a condominios o loteos con construcción simultánea representan el 79,1 % del total de las viviendas recepcionadas por la D.O.M. para la comuna de Concepción, entre el año 2005 y el 13 de junio del año 2018, correspondiente a la fecha de análisis. También se puede confirmar en la ubicación de estos nuevos conjuntos (Figura 4.4), la tendencia planteada por Azocar et al, (2010) que apuntaba a Concepción dentro de las comunas que estaban experimentando mayor crecimiento de uso residencial, particularmente en las zonas periféricas de los núcleos urbanos tradicionales.

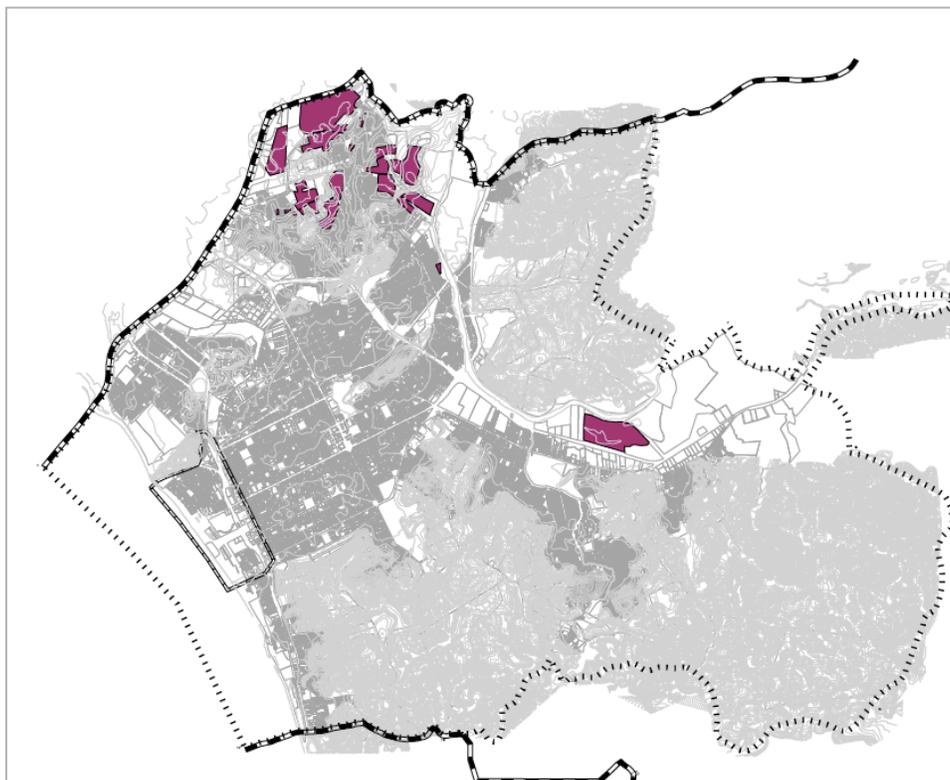


Figura 4.4: Polígonos seleccionados en la comuna de Concepción, correspondientes a viviendas en condominio o loteo con construcción simultánea, que cumplieran con los parámetros establecidos para el caso de estudio.

4.3 Caracterización del caso de estudio

4.3.1 Condiciones de la unidad habitacional

La tipología de vivienda establecida por los modelos inmobiliarios como unidad habitacional de sus conjuntos, no presenta variaciones radicales, ya que es el resultado de una ecuación formal que permite, por un lado, generar la mayor rentabilidad posible al terreno de emplazamiento del conjunto, y por otra parte contar con una superficie de “patio” que sea atractivo para el segmento familiar apuntado. Respecto al volumen edificado, este se resuelve generalmente en dos plantas o bien dos plantas más ático. En ambos casos la materialidad del piso superior es liviana, mientras que el primer piso está desarrollado a partir de materiales más densos, como albañilería de ladrillo u hormigón armado. El programa se resuelve en una primera planta que va desde los 39 a 58 m², mientras que la segunda se desarrolla entre 56 m², finalmente los áticos van desde los 14 m² a los 28 m². La combinación más

recurrente está dada por un aproximado de 47 m² para las dos primeras plantas y 27 m² para el ático. Tipológicamente las viviendas no difieren entre sí (Figura 4.5), primando las cubiertas a dos aguas, las cuales generalmente contienen el nivel superior a partir de tijerales de madera.



Figura 4.5: Tipología de viviendas, sector Lomas de San Sebastián, Comuna de Concepción.

Para el caso particular de los áticos, estos quedan abiertos a modificaciones por parte de los propietarios, puesto que la vivienda puede ser entregada con el ático habilitado, o bien en obra gruesa, para ser terminada según el uso que demanden sus dueños. En los casos de los áticos que se entregan habilitados, generalmente están constituidos por un dormitorio y el espacio restante se considera como una sala de estar, por lo cual queda abierta la opción de configurar otro dormitorio, dejando un pequeño espacio de distribución a partir de la llegada de la escalera. Finalmente se puede dar el caso de dejar el ático como un gran espacio, sin ninguna división interior. Todo lo anterior se puede realizar, debido a que tanto el entrepiso que da base al ático, como los tabiques divisorios, están materializados en base a estructuras lineales de madera en conjunto con placas.

Cada modificación que experimente el ático, se transforma en variables de análisis para esta investigación (ver matriz de evaluación en metodología) ya que cualquier obstrucción al paso de aire recae en el desempeño de la ventilación natural al interior. De la misma manera, influirá la operación de ventanas y puertas, así como la incorporación del windcatcher.

4.3.2 Condiciones del modelo de conjunto

Como área de estudio se estableció el sector de Lomas de San Sebastián, ya que ésta cuenta con la mayor cantidad de loteos o condominios seleccionados en el análisis de representatividad desarrollado en el punto 4.2.2. Por otra parte, este sector se sitúa en las zonas periurbanas que experimentan mayor crecimiento de uso residencial, según lo expuesto por Azocar et al. (2010). Finalmente, el sector es parte de las zonas de propagación de loteos y barrios cerrados, determinado por Pérez et al. (2008) en la comuna de Concepción. Todo lo cual se ajusta al interés de la investigación, ya que el modelo de condominio, por una parte, representa una tendencia como modelo residencial y por otra genera las condiciones de proximidad entre viviendas que dificulta el aprovechamiento de la ventilación natural. (Figura 4.6)

El área de estudio se emplaza en la zona HE3, tipificado en el (PRCC) como barrio de expansión residencial con equipamiento vecinal, permitiendo tipología mixta de edificación, con edificios de altura media, condominios y vivienda de tipo aislada y pareada.

Por su parte, los condominios como modelo de agrupación residencial, se acogen a la ley de copropiedad inmobiliaria (ley 19537), la cual tiene como objeto general establecer condominios integrados por inmuebles divididos en unidades sobre las cuales se pueda constituir dominio exclusivo a favor de distintos propietarios, manteniendo uno o más bienes en el dominio común de todos ellos. También es materia de esta ley, establecer las bases para que cada comunidad establezca su propio reglamento dentro del predio compartido. Sin embargo, tanto las condiciones edificatorias como urbanísticas de estos condominios, deberán responder a lo que dicta la (O.G.U.C) en conjunto con el plan regulador correspondiente.

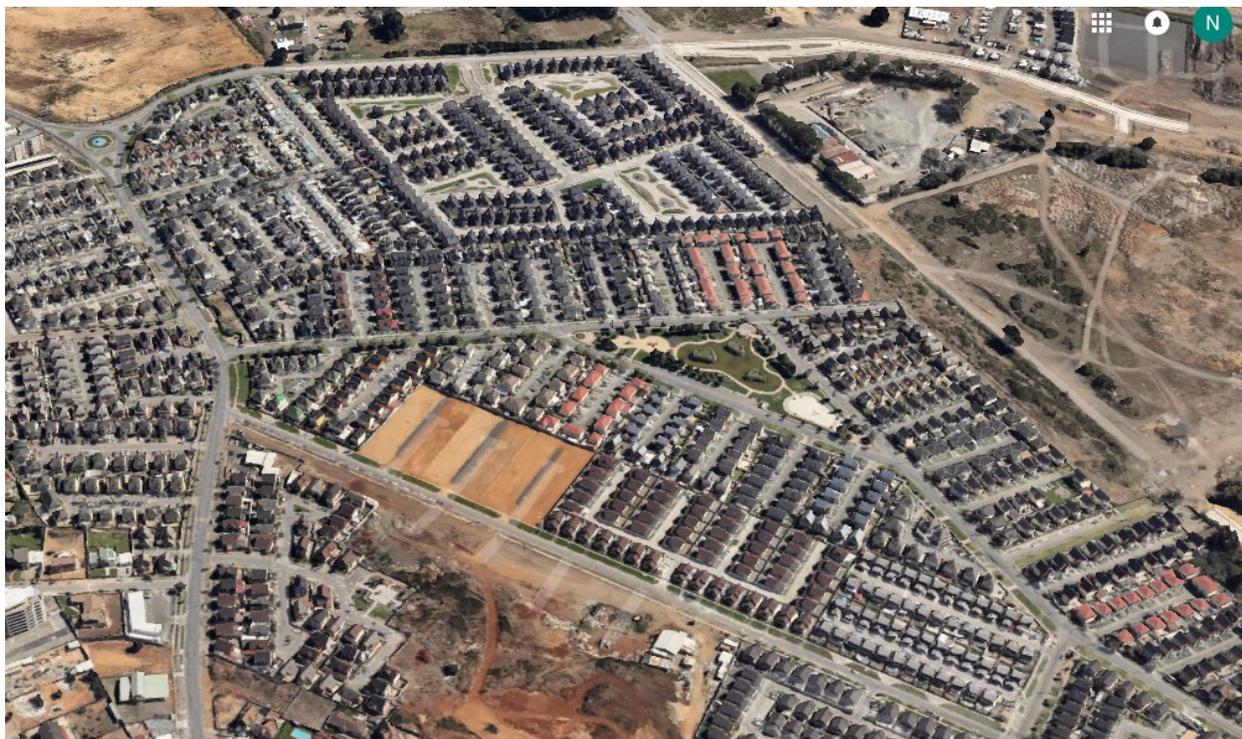


Figura 4.6: Condominios lomas San Sebastián, zona de expansión residencial de la comuna de Concepción. (Fuente Google Earth. Observado el 5 de septiembre del 2018)

Respecto a las densidades que puedan generarse al interior de los condominios, estas son reguladas por el PRCC). Para el caso del sector HE3, la densidad máxima bruta para viviendas unifamiliares, corresponde a 144 hab/há, mientras que el coeficiente máximo de ocupación es de un 0,6 para viviendas unifamiliares y edificios colectivos en extensión. No obstante, el modelo de condominio en pocas ocasiones se acerca al máximo de ocupación permitido, puesto que la oferta inmobiliaria consiste en un esquema de vivienda aislada que permita contar con un pequeño patio, el cual, sumado a las áreas comunes, completa el total de la superficie del predio. Dentro de los esquemas básicos de distribución para el modelo de condominio, el más recurrente está dado por las viviendas enfrentando sus fachadas (frontones) a un pasaje o área de circulación vehicular de uso común (Figura 4.7), dejando el menor distanciamiento lateral entre viviendas, con el fin de dejar superficie en la parte posterior de la vivienda, dando cabida al patio.

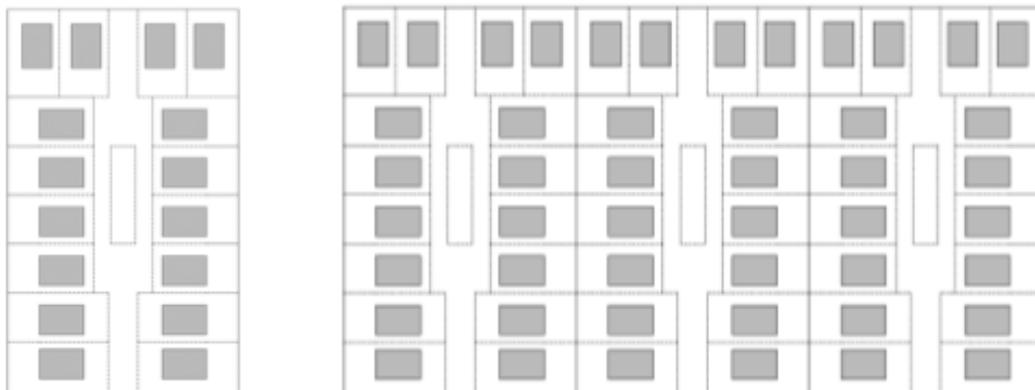
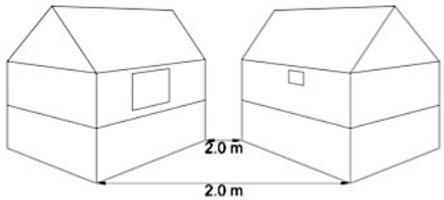
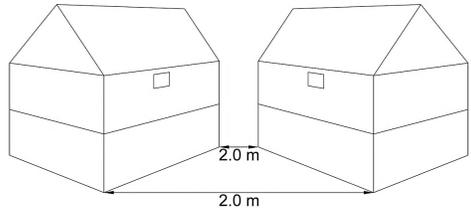
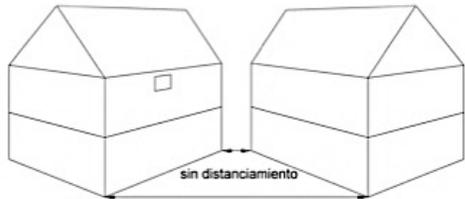
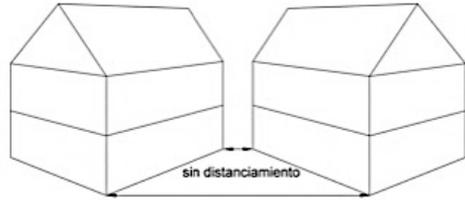


Figura 4.7: Esquema básico de distribución en condominios, utilizado comúnmente. A la izquierda el desarrollo del esquema básico en un predio, mientras que a la derecha se observa la sucesión del esquema formando condominios contiguos

En lo que refiere a la proximidad entre unidades de viviendas dentro del modelo de condominio, esto obedece a lo dictado por la O.G.U.C. en el artículo 4.1.15, donde se plantea, que en los conjuntos de viviendas de hasta tres pisos de altura, se deberán contemplar los distanciamientos mínimos entre fachadas detallados en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Distanciamiento mínimo entre fachadas de viviendas en conjunto, según artículo 4.1.15 O.G.U.C.

Características entre fachadas	Distanciamiento
Con vano de recintos habitables	
Con vano de recintos habitables y sin vano	

<p>Con vano de recintos habitables y con vano de recinto no habitable</p>	
<p>Con vano de recintos no habitables</p>	
<p>Con vano de recintos no habitables y sin vano</p>	
<p>Sin vano que se enfrenten entre sí</p>	

Dichas condiciones favorecen la proximidad lateral entre viviendas, dejando en muchos casos fachadas sin vanos laterales o bien con vanos de recintos no habitables con el fin de disminuir el distanciamiento, disminuyendo o imposibilitando con esto, las opciones de generar ventilación natural en este sentido de la vivienda. A diferencia de la fachada frontal y posterior, donde se concentran las ventanas, existiendo mayores posibilidades de conseguir ventilación cruzada. Sin embargo, la proximidad entre los frentes de las viviendas, producto del esquema general del modelo de condominio, dificulta de igual manera la exposición de las fachadas con vanos a los flujos de viento.

4.3.3 Condiciones de la unidad habitacional y modelo simplificado

Para efectos de llevar el caso de estudio a un modelo simplificado que permita realizar análisis de flujos y simulaciones térmicas, se ha depurado la tipología de vivienda a partir de la planimetría recopilada de los condominios analizados en los archivos de la D.O.M. La vivienda en cuestión está desarrollada en una primera planta de 47,46 m², una segunda planta de 47,46 m² y una tercera planta en ático de 27,43 m² (Figura 4.8).

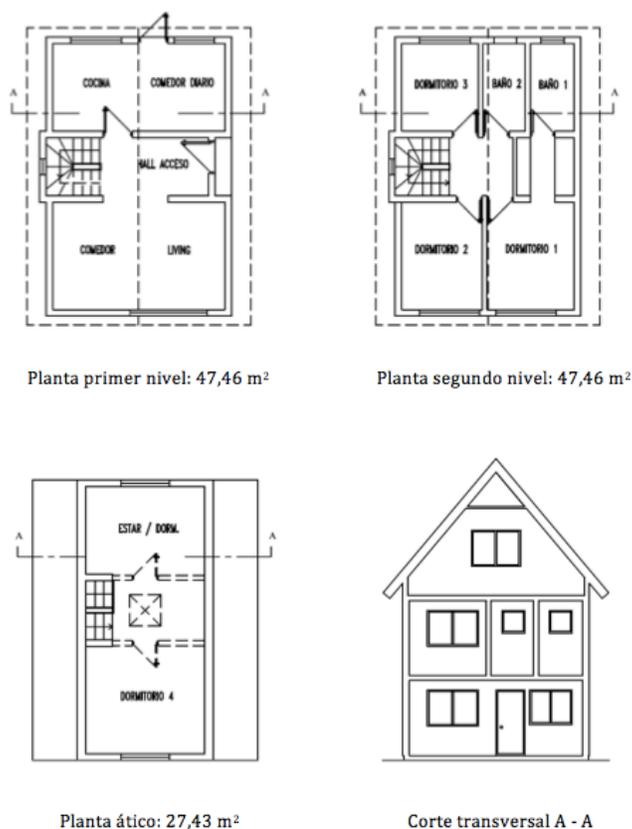


Figura 4.8: Modelo simplificado de la vivienda considerada como caso de estudio

Los primeros dos niveles fueron materializados a partir de muros estructurales de albañilería 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 y placas, muros perimetrales y entepiso desarrollados en madera.

4.3.4 Materialidad y propiedades térmicas del caso de estudio

La determinación de los materiales considerados para el caso de estudio, respondió a lo recopilado en las especificaciones técnicas de los proyectos de condominios ingresados a la D.O.M de la comuna de Concepción, según el análisis de representatividad. Se seleccionó la solución constructiva que se reiteraba en los proyectos consultados. Dichas especificaciones técnicas responden al marco normativo correspondiente a un proyecto ingresado y aprobado para su construcción.

- **Muros perimetrales exteriores, albañilería de ladrillo reforzada:** Muro perimetral de albañilería armada, en base a ladrillo hecho a máquina de dimensiones nominales 290 x 140 x 71 mm. Por la cara exterior de este muro va un estuco de arena cemento de 15 mm de espesor. Por la cara interior va adherida una plancha de poliestireno expandido de 10 mm de espesor y 15 kg/m³ densidad, sobre la cual se ha colocado una plancha de yeso cartón de 10 mm de espesor. **Valor U de: 1,32 W/m² K**
- **Muros perimetrales exteriores, livianos (Madera).** Muro perimetral exterior con aislación térmica en el núcleo del tabique en base a poliestireno expandido de 50 mm de espesor y 15 kg/m³ densidad. El elemento está formado por una estructura de madera hecha con listones de pino radiata de 2x3" cepillado. Consta de pie-derechos distanciados entre ejes a 0,60 m. Esta estructuración de madera está forrada en su cara interior por una placa de madera de OSB de 9,5 mm de espesor, a la cual se le adhiere como revestimiento una plancha de yeso-cartón estándar de 10 mm de espesor. La otra cara que limita con el exterior está forrada con una placa de madera de OSB de 9,5 mm de espesor, revestida por plancha de fibrocemento de 6 mm de espesor. **Valor U de: 0,58 W/m² K**
- **Muros divisorios interiores de albañilería de ladrillo:** Muro de albañilería construido con ladrillos cerámicos hechos a máquina, de dimensiones nominales 290 mm x 140 mm x 94 mm, utilizando un mortero de pega de dosificación 1:3 y estuco con mortero tradicional de 20 mm por ambas caras del muro. **Valor U de: 1,81 W/m² K**
- **Muros divisorios interiores, livianos (Madera):** Conformado por una estructura de madera hecha con listones de pino radiata de 2 x 4" cepillado. Consta de pie-derechos distanciados entre ejes a 0,60 m. Esta estructuración de madera está revestida por ambas caras por placas de yeso-cartón estándar de 10 mm de espesor. **Valor U de: 2,01 W/m² K**
- **Techumbre principal:** Estructura soportante, madera de pino 2x6" cepillado. Sobre las cuales se fija una placa de madera de OSB de 15 mm de espesor, sobre la que se dispondrá fieltro asfáltico

de 15 lbs, recibiendo como terminación de cubierta, teja asfáltica gravilla, color negro. Como terminación interior del paquete de techumbre se contempla plancha de yeso-cartón estándar de 10 mm de espesor. El interior del paquete estará compuesto por una capa de aislación térmica de poliestireno expandido de 100 mm de espesor y 15 kg/m^3 densidad, dejando una cámara de aire estanca de 40 mm. **Valor U de: $0,35 \text{ W/m}^2 \text{ K}$**

- **Cielo ático:** Conformado por una estructura de madera hecha piezas de pino radiata de 2x4" cepillado. A la cual van fijadas placas de yeso-cartón estándar de 10 mm de espesor. Sobre estas se dispone aislación térmica en base a poliestireno expandido de 100 mm de espesor y 15 kg/m^3 densidad. **Valor U de: $0,38 \text{ W/m}^2 \text{ K}$**
- **Piso primer nivel:** Como pavimento para el primer nivel se considera piso flotante de 8 mm de espesor (excepto zonas húmedas). Como base de pavimento se considera radier afinado de hormigón de 200 Kg/cm^3 de 70 mm de espesor sobre una capa de polietileno de 0,15 mm y bajo esta una capa de arena de 50 mm la que a su vez irá sobre una capa de grava de 50 mm, esta última deberá estar sobre terreno compactado. **Valor U de: $0,80 \text{ W/m}^2 \text{ K}$** * Se ajustó el valor U en función del contacto con el suelo.
- **Losa entrepiso:** Entre el primer y segundo piso se considera losa de hormigón armado de 120 mm de espesor. En su cara superior tendrá como solución de pavimento de alfombra bouclé de 5 mm de altura de pelo. Mientras que en la cara inferior de la losa estará terminada con enlucido de yeso de 15 mm de espesor. **Valor U de: $2,65 \text{ W/m}^2 \text{ K}$**
- **Entrepiso de madera:** Entre el segundo nivel y el ático se contempla entre piso de madera realizado a partir de vigas de pino 2x6" cepillado. Sobre las cuales se fija una placa de madera de OSB de 15 mm de espesor, sobre la que se dispondrá como solución de pavimento de alfombra bouclé de 5 mm de altura de pelo. Mientras que en la cara inferior del paquete de entrepiso estará terminada con placas de yeso-cartón estándar de 10 mm de espesor. **Valor U de: $1,74 \text{ W/m}^2 \text{ K}$**
- **Ventanas:** La totalidad de ventanas exteriores se ejecutaron con perfiles de aluminio, tipo corredera. El paño vidriado está constituido por doble vidrio con cámara de aire estanco en orden 4 mm + 12 mm + 6 mm. **Valor U de: $3,23 \text{ W/m}^2 \text{ K}$**

Respecto a las exigencias de acondicionamiento térmico para viviendas, determinada por el artículo 4.1.10 de la O.G.U.C, las soluciones constructivas presentadas por el caso de estudio, cumple con los valores “U” requerido para la zona 4, correspondiente a la comuna de Concepción. (Tabla 4.2).

Tabla 4.2: Distanciamiento mínimo entre fachadas de viviendas en conjunto, según artículo 4.1.15 O.G.U.C.

Zona	Techumbre		Muros		Pisos Ventilados	
	U	Rt	U	Rt	U	Rt
	W/m ² K	M ² k/W	W/m ² K	M ² k/W	W/m ² K	M ² k/W
1	0,84	1,19	4,0	0,25	3,60	0,28
2	0,60	1,67	3,0	0,33	0,87	1,15
3	0,47	2,13	1,9	0,53	0,70	1,43
4	0,38	2,63	1,7	0,59	0,60	1,67
5	0,33	3,03	1,6	0,63	0,50	2,00
6	0,28	3,57	1,1	0,91	0,39	2,56
7	0,25	4,00	0,6	1,67	0,32	3,13

4.4 Evaluación experimental de las temperaturas interiores en un ático para la tipología estudiada

4.4.1 Condiciones de medición de las temperaturas interiores del ático

Con el fin de conocer el comportamiento de las temperaturas experimentadas al interior de un ático en un periodo de días cálidos, se realizó un análisis in-situ de las condiciones ambientales de dicho recinto. Para ello se obtuvieron los valores de las temperaturas del aire interior, a través de un medidor de estrés térmico HD32.3 WBGT (Figura 4.9), las cuales se contrastaron con las temperaturas exteriores registradas para esos días en la ciudad de Concepción.

Las mediciones se llevaron a cabo en el ático de una vivienda del condominio San Francisco de Asís en el sector Lomas de San Sebastián de la comuna de Concepción. Dicha vivienda pertenece a la tipología considerada para este estudio, guardando relación con el modelo simplificado que actuará como base para las simulaciones. Por su parte, las condiciones establecidas para realizar la medición, consideraron un ático configurado por un dormitorio con orientación norte y un estar con orientación sur, el cual

contenía la caja de escala. Las mediciones se realizaron en el dormitorio, el cual contaba con una sola ventana, la cual se mantuvo completamente cerrada al igual que la puerta. No se presentaron ganancias internas por equipos de ningún tipo, ni por efecto de iluminación, tampoco hubo presencia de personas durante todo el periodo de medición. El instrumento instaló a una altura de 1,1 m y se ubicó a 1,5 m del muro norte, a 1,8 m del muro oriente y a 2,7 m del muro poniente (Figura 4.9). El periodo de evaluación se concentró entre el día 25 de noviembre y el 1 de diciembre del año 2016, registrando mediciones a intervalos de cinco minutos. Respecto a los datos de la temperatura del ambiente exterior, estos fueron obtenidos en la estación meteorológica Carriel Sur, Concepción.

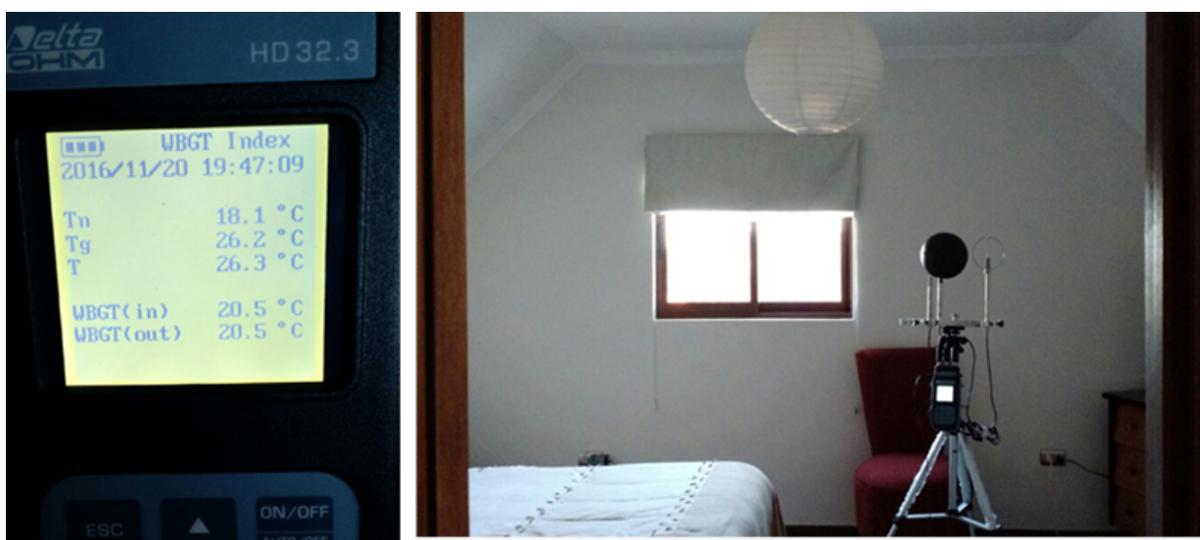


Figura 4.9: Registro de temperaturas interiores del ático, a través de un medidor de estrés térmico HD32.3 WBGT.

4.4.2 Análisis de resultados y conclusión.

Para visualizar el comportamiento de las temperaturas del ático respecto a las temperaturas exteriores, se generaron registros cada una hora para ambas variables de análisis, ver tablas y gráficos en Anexo A1. En general las temperaturas interiores estuvieron por sobre las exteriores, para todos los días analizados. En el caso del primer día, las temperaturas interiores alcanzaron las mayores diferencias respecto a las exteriores en las primeras horas de la madrugada, llegándose a generar diferencias de 9,3 K. Sin embargo, cabe destacar que las diferencias son generadas por la disminución de las temperaturas

exteriores en relación al comportamiento más homogéneo de las temperaturas interiores (Figura 4.10). El día 26 de noviembre, correspondiente al segundo día de análisis, presentó temperaturas con mayor similitud en su comportamiento, manteniendo una diferencia promedio aproximado de 6,7 K entre las temperaturas interiores y las exteriores a lo largo del día (figura 4.11).

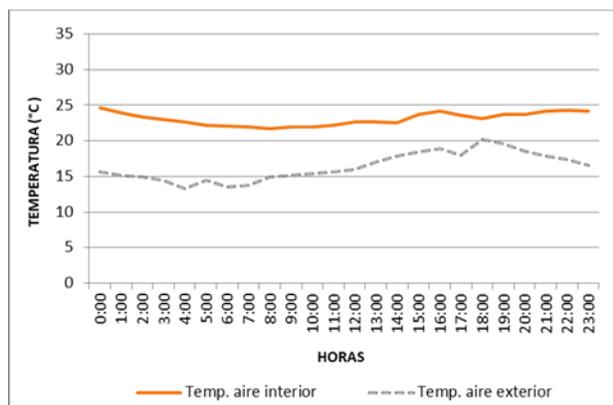


Figura 4.10: Medición temperaturas ático, día 25 nov. 2016

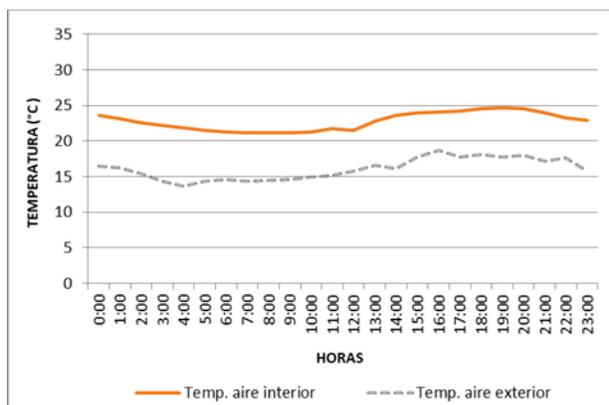


Figura 4.11: Medición temperaturas ático, día 26 nov. 2016

El tercer día, las temperaturas interiores encuentran su mayor diferencia con las exteriores en la madrugada y la mañana, comenzando a acercarse a partir del mediodía, que es cuando empieza a subir la temperatura exterior (Figura 4.12). Por su parte el cuarto día (Figura 4.13), las temperaturas se alejan entre sí en la madrugada y la mañana, disminuyendo la diferencia en horas de la tarde, comportándose de forma similar ambas temperaturas en este último tramo del día.

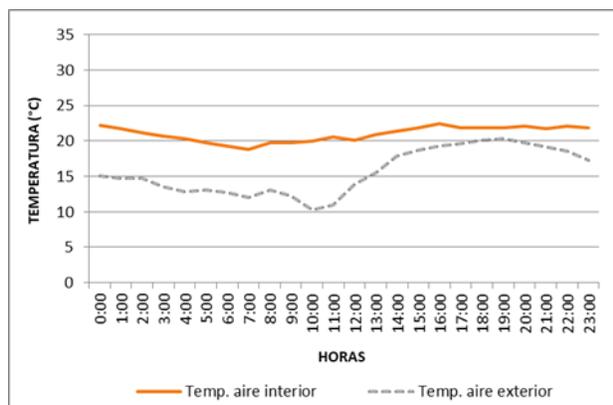


Figura 4.12: Medición temperaturas ático, día 27 nov. 2016.

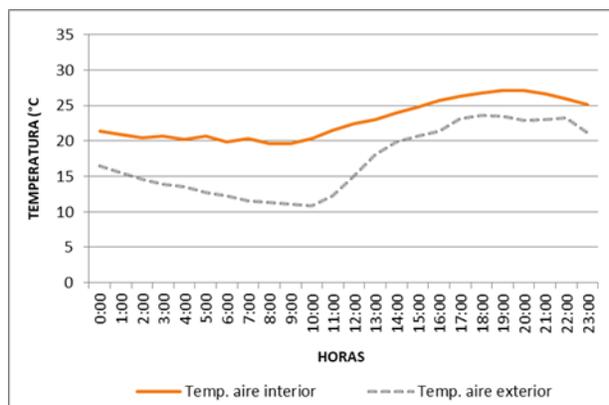


Figura 4.13: Medición temperaturas ático, día 28 nov. 2016

El día 29 de noviembre, correspondiente al quinto día de análisis (Figura 4.14), las temperaturas interiores presentaron diferencias respecto a las exteriores en la madrugada, intensificándose en las primeras horas de la mañana. Sin embargo, a partir de las 10:00 h la temperatura exterior comienza a experimentar un alza, la cual es acompañada por las temperaturas interiores en similar diferencia, hasta llegar a los 30 °C, donde las temperaturas interiores moderaron su ascenso en relación a las exteriores. Finalmente, estas últimas tras un periodo de oscilación encontraron su máxima a los 32 °C generando desde ahí el descenso de ambas temperaturas. El sexto día de análisis (Figura 4.15) las temperaturas interiores y exteriores presentaron una diferencia más homogénea entre sí, manteniendo una diferencia promedio de 7,1 K a lo largo del día.

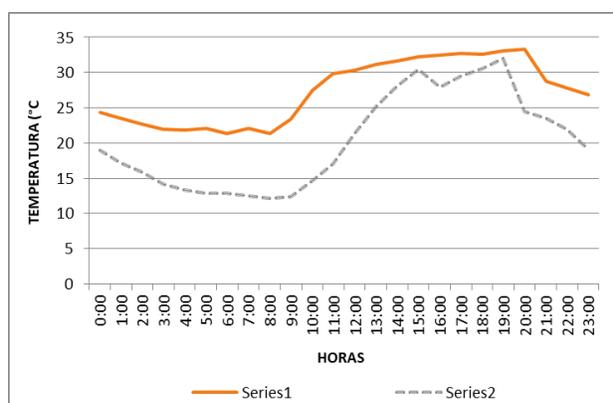


Figura 4.14: Medición temperaturas ático, día 29 nov. 2016.

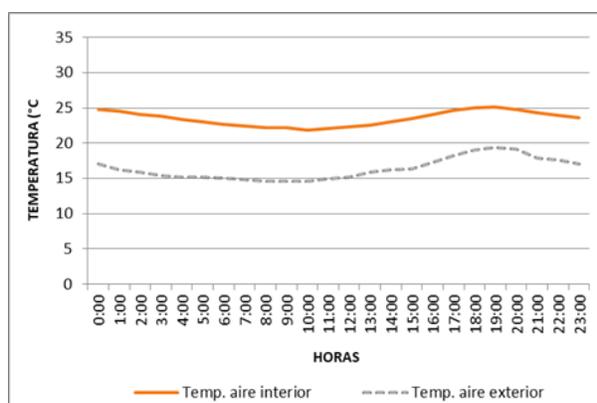


Figura 4.15: Medición temperaturas ático, día 30 nov. 2016

Por último, el día 1 de diciembre, correspondiente al séptimo día y ultimo del análisis (Figura 4.16), presentó diferencias homogéneas en la madrugada y la mañana, a excepción de las 9:00 h que la temperatura exterior experimentó una caída, la cual no fue seguida por la temperatura interior, generando una diferencia de 8,4 K, la mayor para este día.

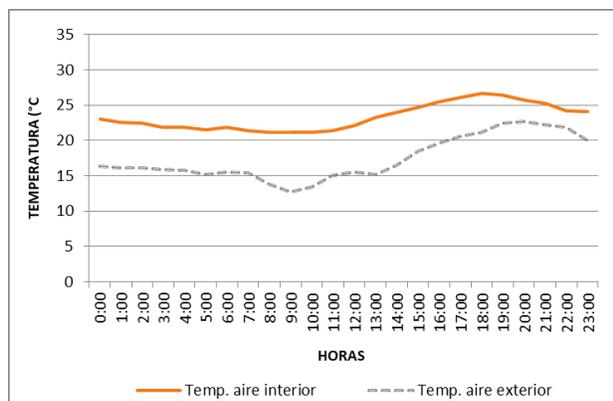


Figura 4.16: Medición temperaturas ático, día 1 dic. 2016.

En síntesis, tras la evaluación de las temperaturas experimentadas al interior del ático, podemos concluir que:

- Las temperaturas al interior del ático se alcanzan sobre las temperaturas exteriores, con diferencias promedio diarias que van desde los 5,4 K a los 7,1 K para los días analizados.
- Las temperaturas registradas al interior del ático tienden a ser más estables en comparación a las oscilaciones que experimentan las temperaturas exteriores. Esto último genera diferencia entre ambas temperaturas que aumenta en el caso de un descenso puntual de las temperaturas exteriores, ya que las temperaturas interiores tienden a estabilizarse y mantener su inercia sin acusar el cambio. De la misma manera cuando las temperaturas exteriores experimentan un alza, las temperaturas interiores tienden a mantener su tendencia, disminuyendo la diferencia entre temperaturas interiores y exteriores.
- El periodo nocturno se reconoce como el que presenta las mayores diferencias entre temperaturas interiores y exteriores, ya que en este periodo se experimenta un descenso de las temperaturas exteriores, frente a temperaturas interiores que en algunos casos no solo se mantienen, sino que aumentan. Esto último atribuible al calor acumulado tras un día de altas temperaturas y liberado en horas de la noche.

Finalmente podemos concluir que el ático en las condiciones de evaluación descritas, queda expuesto a temperaturas elevadas respecto a las temperaturas exteriores, particularmente en horas de la noche.

4.5 Especificaciones del dispositivo de ventilación (windcatcher) para el caso de estudio

Tomando en consideración lo planteado en el capítulo 2 respecto al funcionamiento y desempeño de los windcatchers contemporáneos, así como también los antecedentes expuestos en el capítulo 3, referidos a la selección en particular de un sistema de ventilación para la investigación, es que finalmente se da paso a la elección y especificación del modelo que será aplicado al análisis del caso de estudio. Para esto se tomó como base la línea de Windcatcher™ producida por la empresa Monodraught, seleccionando el modelo recomendado por dicho fabricante para el volumen de aire a asistir por el dispositivo. De acuerdo a esto, se especificó el Windcatcher™, Square – Classic 95, el cual cubre un rango de superficie de 0 - 50m² con una altura máxima de piso a cielo de 3 m, lo cual está en concordancia con el ático del caso de estudio que presenta 27,43 m² con una altura de piso a cielo de 2,4 m. Por su parte, las dimensiones del windcatcher son las especificadas por el fabricante para el modelo seleccionado (figura 4.17) y (tabla 4.3).

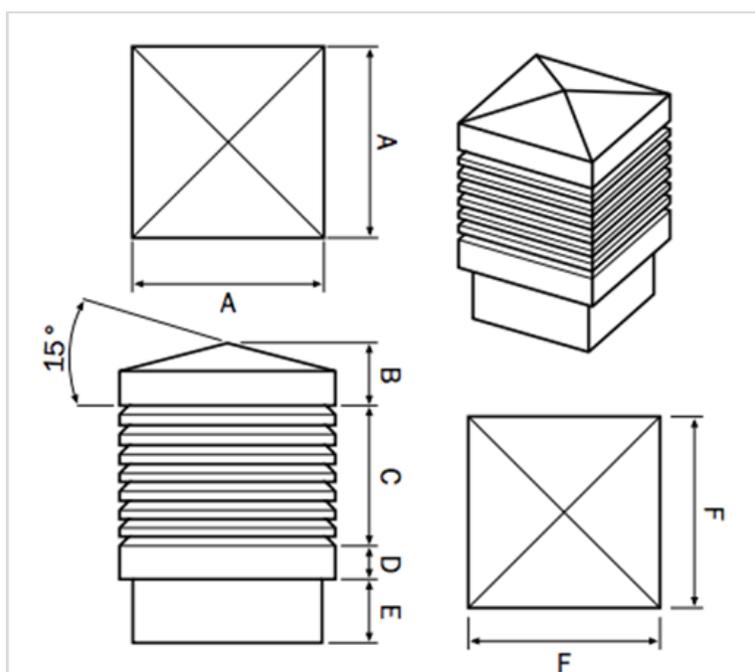


Figura 4.17: Levantamiento gráfico de las dimensiones del Windcatcher™, Square – Classic 95. Fuente: Catalogo Monodraught Natural ventilation.

Tabla 4.3: : Dimensiones del Windcatcher™, Square – Classic 95. (Elaboración propia en base a catalogo Monodraught Natural ventilation).

Modelo	Ancho vol. Receptor	Altura borde sup.	Altura louvre	Altura borde inf.	Longitud tronco	Ancho tronco	Peso	Nº de louvres	Área libre louvre
	Dim. A	Dim. B	Dim. C	Dim. D	Dim. E	Dim. F	Kg		m ²
95	706 mm	245 mm	460 mm	150 mm	278 mm	600 mm	49	7	0,196

El windcatcher considerado para el estudio, cuenta con protección por diseño para las condiciones climáticas exteriores como lluvia o intrusión, permitiendo ventilación natural segura (Figura 4.18), además posee sensores de temperatura y CO₂, los cuales accionan los dampers que controlan el ingreso y egreso del volumen de aire al espacio interior, permitiendo ventilación en dosis programadas durante la temporada de calefacción en invierno o bien cuando bajen las temperaturas en las noches de verano. Sin embargo, para efecto de esta investigación se consideraron los dampers completamente abiertos para poder evaluar el desempeño máximo del dispositivo.



Figura 4.18: Windcatcher™ Square – Classic, de la firma Monodraught, con un corte para poder visualizar la configuración de las celosías exteriores y la compartimentación interior.

4.6 Conclusiones capítulo 4

La recopilación de antecedentes que respaldan la idoneidad del caso de estudio, 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 en el diseño de los conjuntos, que garantice la ventilación natural para sus unidades. Reconociendo dentro de estas consideraciones los distanciamientos entre viviendas, la orientación de estas en relación a los vientos predominantes y finalmente el diseño de la vivienda propiamente tal.

Como lugar de estudio se determinó la ciudad de Concepción, que por una parte cuenta con un régimen de vientos que ofrece un alto potencial para ventilar naturalmente, y al mismo tiempo manifiesta una clara tendencia a la proliferación de viviendas en condominios o loteos de construcción simultánea, representando un 79,1% del total de las viviendas recepcionadas por la D.O.M. para la comuna de Concepción, entre el año 2005 y el 13 de junio del año 2018.

En lo que se refiere a la tipología de vivienda establecida por los modelos inmobiliarios como unidad habitacional de sus conjuntos, no presenta mayores variaciones, ya que es el resultado de una ecuación formal que permite, generar la mayor rentabilidad al terreno de emplazamiento del conjunto, y por otra parte contar con una superficie de “patio” que sea atractivo para el segmento familiar apuntado. A esto se suma, homogeneidad en los materiales de construcción, los que tienden a la elección de material liviano con baja masa térmica para sus niveles superiores y áticos, contribuyendo al sobrecalentamiento de estos últimos.

Por otra parte, se reconoce una adaptación de la tipología de vivienda para lograr el mayor aprovechamiento del sitio, de acuerdo a lo que dicta la normativa (O.G.U.C.) en su artículo 4.1.15 para los distanciamientos entre fachadas en conjuntos de viviendas. Dichas condiciones de proximidad lateral entre unidades, en muchos casos otorga la posibilidad de diseñar fachadas sin vanos laterales o bien vanos de recintos no habitables con el fin de disminuir el distanciamiento. Lo cual genera la disminución o la imposibilidad de generar ventilación natural en este sentido.

Finalmente, tras caracterizar la tipología de vivienda representativa y realizar el levantamiento tanto de las variables arquitectónicas como de las propiedades físicas y constructivas, se efectuó una evaluación experimental del ático de una vivienda de condominio emplazada en los sectores de estudio. La medición entregó alzas de temperaturas al interior del ático respecto a las temperaturas exteriores, con

diferencias promedio diarias que van desde los 5,4 a los 7,1 K para los días analizados. El periodo nocturno se reconoce como el que presentó las mayores diferencias entre temperaturas interiores y exteriores, ya que en este periodo se experimenta un descenso de las temperaturas exteriores, frente a temperaturas interiores que en algunos casos no solo se mantienen, sino que aumentan, producto del calor acumulado tras un día de altas temperaturas y liberado en horas de la noche.

Todo lo anterior permite concluir que la vivienda perteneciente a la tipología de condominio, especialmente su nivel superior o ático, queda expuesto a sobrecalentamiento en la estación de verano, lo cual demanda una solución de ventilación natural, como la que brinda el windcatcher.

Capítulo 5

Evaluación de los flujos de ventilación externos para el caso de estudio en su conformación de conjunto

El presente capítulo desarrolla la evaluación externa, correspondiente a la primera etapa antes señalada, enfocándose principalmente en el comportamiento de los flujos de viento en relación al conjunto residencial al que pertenece la vivienda en análisis (caso de estudio). La herramienta utilizada es el módulo de CFD del software IESVE, denominado MicroFlo. Las condiciones de contorno del modelo, así como las variables de evaluación son presentadas como parte de este capítulo. Los resultados de esta evaluación vinculados al potencial de ventilación de las viviendas, fueron analizados dentro de este capítulo; mientras que los resultados vinculados a las condiciones de exposición a los vientos de las aberturas (ventanas y celosías), se incorporan como dato de entrada para la evaluación interior de la vivienda, desarrollada en el capítulo 6.

5.1 Definición del modelo 3D del conjunto residencial (caso de estudio)

Tras la definición del caso de estudio en el capítulo 4 de la presente investigación y la obtención de un modelo simplificado a partir de este último, se dio paso a la creación de un modelo tridimensional de la vivienda, el cual actuará como base para las posteriores simulaciones requeridas en las evaluaciones propuestas. El modelo se llevó a cabo mediante el software Integrated Environmental Solutions - Virtual Environment, versión 2015, según lo establecido en el punto 3.2 del capítulo de metodología. De ésta manera, se modeló en primera instancia la vivienda como unidad, la cual actuó como base para generar el modelo de conjunto de viviendas. Una vez modelado el conjunto, se pudo conocer el potencial de ventilación a partir de la evaluación de variables de proximidad y orientación entre unidades. Dicha modelación fue realizada en ModellIT, que es el componente para la construcción de modelos 3D del

entorno virtual de la suite IES. Cabe señalar, que una vez realizado el modelo base, éste no solo traspasa su geometría al resto de las aplicaciones del software, sino que al mismo tiempo comparte los datos técnicos ingresados para las simulaciones que se requieran (IES Virtual Environment, 2015 a).

La definición del modelo 3D de la vivienda correspondiente al caso de estudio, tiene una superficie de 136 m², desarrollada en 2 niveles, más una tercera planta de ático de acuerdo al proyecto de arquitectura y especificaciones técnicas detalladas en el capítulo 4. Cabe destacar que se simplificó toda la información que no sea relevante para efectos de la simulación, puesto que de lo contrario puede ocasionar una sobre exigencia para el motor de cálculo del software, llevándolo a generar errores.

El modelo del conjunto destinado a las simulaciones exteriores (figura 5.1) considera 20 viviendas, de las cuales 4 se ubican en el sentido longitudinal a la vivienda caso de estudio y 5 en el sentido transversal, con el fin de contar con una cantidad de unidades que permita visualizar el impacto de las viviendas aledañas en el flujo del viento. Por otro lado, en relación a los distanciamientos, se definió una distancia de 4 m entre las fachadas laterales de las viviendas y 12 m entre fachadas frontales. Las medidas antes indicadas provienen del análisis de las condiciones de conjunto.

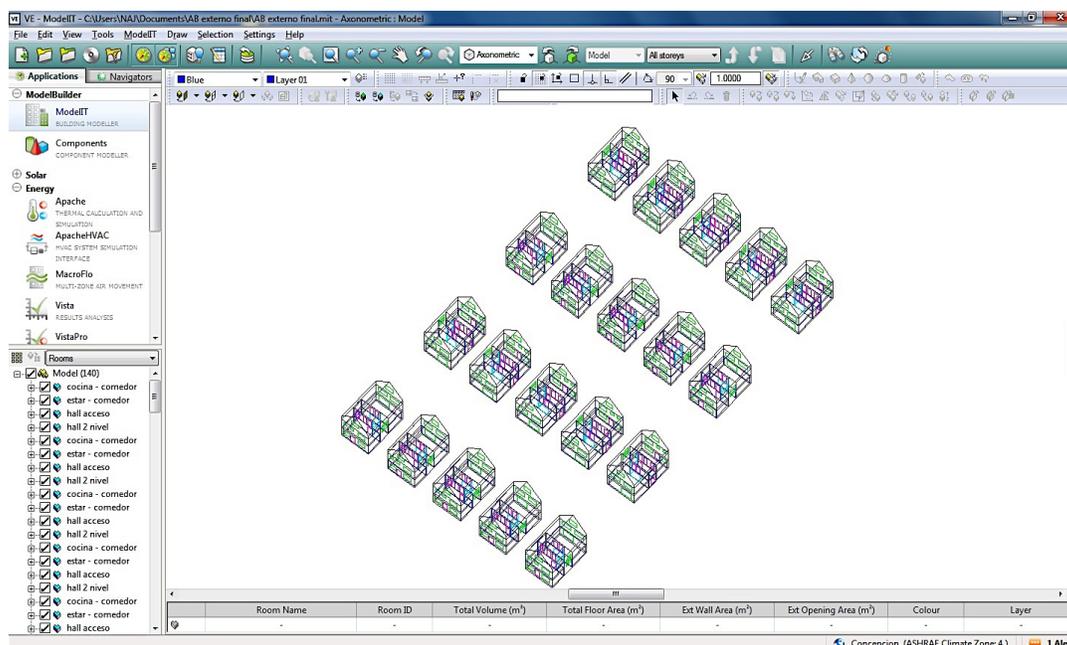


Figura 5.1: Modelación del conjunto de viviendas a través del componente de construcción de modelos de IESVE, ModelIT.

5.2 Condiciones de simulación del conjunto residencial

Para evaluar las condiciones o potencial de ventilación natural para el caso de estudio, se realizó un análisis de flujo externo sobre las viviendas, asumiendo las condiciones de proximidad entre ellas producto del modelo de agrupación usual de los condominios analizados en el capítulo 4.

A causa de lo anterior, se generó a partir de la modelación del conjunto creada en ModellT (figura 5.1), una simulación externa con MicroFlo, que es la herramienta de análisis de CFD del software IES. Ésta permite obtener una estimación del flujo de aire entregado por el viento alrededor de la vivienda inmersa en el conjunto. Este tipo de análisis es de carácter isotérmico y no considera aberturas entre el exterior y el interior del modelo. Además, esta aplicación no lee datos meteorológicos, sino que se vale de los datos ingresados por el usuario como condiciones de borde al modelo de simulación.

5.3 Variables del modelo para evaluación de los flujos externos

Para evaluar el potencial de ventilación del caso de estudio respecto a las condiciones del conjunto residencial, se generaron cuatro variables en el modelo base. Las dos primeras variables correspondieron al caso de estudio con dos orientaciones diferentes respecto al viento; la primera denominada “Cv-A”, es la evaluación del conjunto residencial orientado con sus fachadas frontales al flujo de viento predominante para el mes de enero, esto quiere decir en dirección sur –poniente con una intensidad media del viento de 7,7 m/s (NCh 1079, 2008); mientras que la segunda simulación “Cv-B”, corresponde al conjunto de viviendas con la fachada lateral expuesta al flujo de viento predominante, con iguales condiciones de velocidad y dirección de viento. Las dos simulaciones restantes incorporan el Windcatcher a las viviendas, repitiendo las condiciones de orientación a los vientos recién planteadas. 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.

5.4 Datos de entrada análisis CFD (MicroFlo).

5.4.1 Condiciones de viento (orientación, velocidad)

Respecto a la dirección del viento, se analizaron dos escenarios de viento incidente sobre las fachadas de las viviendas. La primera enfrentando a las fachadas principales de las viviendas (frontones); mientras que la otra opción considera el viento de forma perpendicular al frente de la vivienda (ver figura 5.2). Dicha dirección de viento se basa en la dirección sur-poniente, que corresponde al viento predominante para la estación de verano

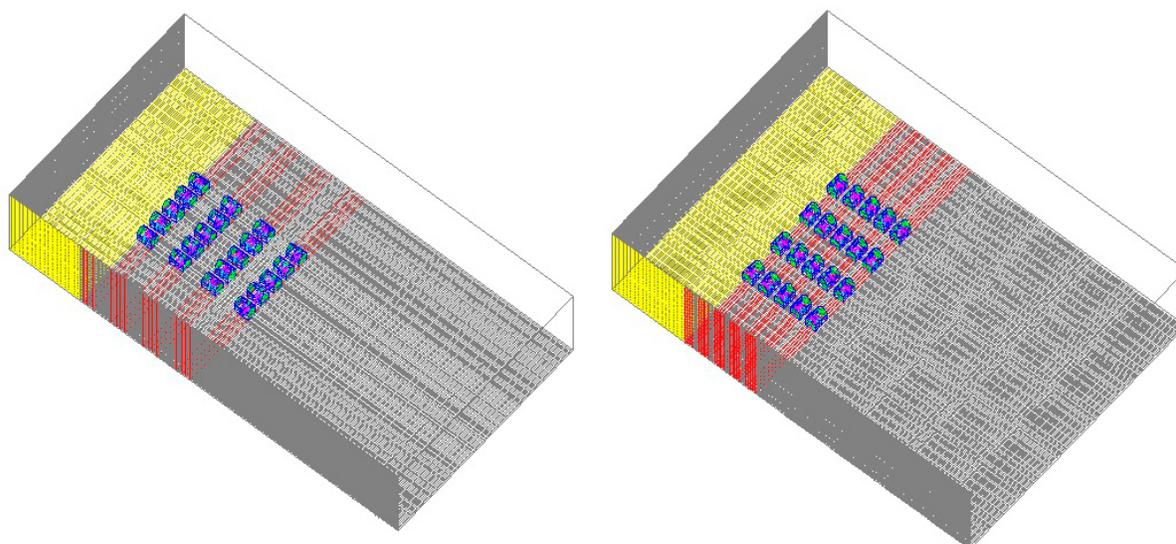


Figura 5.2: Dominio de análisis con las dos orientaciones a evaluar. En la izquierda el conjunto enfrentando con sus fachadas frontales al flujo de viento predominante, mientras que a la derecha el conjunto recibiendo al viento de forma lateral a las fachadas frontales.

La velocidad del viento para ambos análisis de orientación fue 7,7 m/s correspondiente a la intensidad media del viento para el mes de enero en la estación Carriel Sur de la ciudad de Concepción. (NCh 1079, 2008)

En lo que refiere a los parámetros de exposición para el modelo, la herramienta de evaluación externa de IESVE “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. Para efecto de este análisis se consideró como parámetro de exposición la opción de Suburbio, el cual se ajusta a zonas urbanas y suburbanas, áreas boscosas u otros terrenos con numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas que tengan el tamaño de viviendas unifamiliares o más grandes en una extensión de al menos 2000 m o 10 veces la altura de la estructura a favor del viento, todo lo cual concuerda con el entorno en el que el caso de estudio se inserta.

5.4.2 Parámetros de simulación del análisis externo

Para efectos de la evaluación externa del conjunto se consideró la siguiente configuración:

Modelo de turbulencia: para modelar el flujo externo, se utilizó el modelo de turbulencia “k-e”, el cual presenta buenos resultados en evaluaciones en el campo de la ventilación de acuerdo a lo recopilado por Calautit y Hughes (2014 b).

Ajuste de discretización: como ajuste de discretización, se utilizó la opción “Upwind” que es el método más básico y de menor demanda computacional, vinculado con los coeficientes de difusión de convección combinados que resultan de la discretización del conjunto de ecuaciones definidoras.

Configuración de la cuadrícula: para la configuración de la cuadrícula se consideró un espaciado de esta última de 1 m y una tolerancia de fusión de línea de cuadrícula de 0,1 m.

La extensión del dominio se definió, según los parámetros recomendados por MicroFlo, para este tipo de análisis. El cual toma como referencia la altura del objeto de estudio, en este caso 8,8 m que es la altura de la vivienda:

- Barlovento: 5 veces la altura del objeto más alto en análisis. (44 m).
- Sotavento: 15 veces la altura del objeto más alto en análisis. (132 m).
- Laterales: 5 veces la altura del objeto más alto en análisis. (44 m).
- Arriba: 5 veces la altura del objeto más alto en análisis. (44 m).

5.5 Análisis de resultados simulación flujos externos

Una vez concluido el proceso de simulación, se interpretaron los datos visualizados con el fin de 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 disponible en IESVE, considera resultados gráficos y no valores numéricos tabulados para establecer la dirección y velocidad del flujo del aire externo que incide en las viviendas. La información resultante entregada por MicroFlo está dada a través de vistas gráficas en cortes 2D aplicados en cualquier zona de la cuadrícula que se estime 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.

Cv-A: análisis externo para el conjunto de viviendas (viento frontal a fachadas, velocidad de viento de 7,7 m/s)

La primera simulación es la evaluación del conjunto residencial cuya orientación presenta sus fachadas frontales al flujo de viento predominante para el mes de enero (Cv-A). En la figura 5.3 podemos apreciar a través de la vista lateral del conjunto, turbulencia del flujo y pérdida de velocidad del aire en el espacio generado entre las viviendas, con un rango de disminución de la velocidad del aire de 6,61 m/s a 2,94m/s, correspondiendo este último valor al recibido en la parte superior de la fachada, ya que en la medida que se aproxima al primer nivel, la velocidad del aire disminuye al rango de 2,21 m/s.

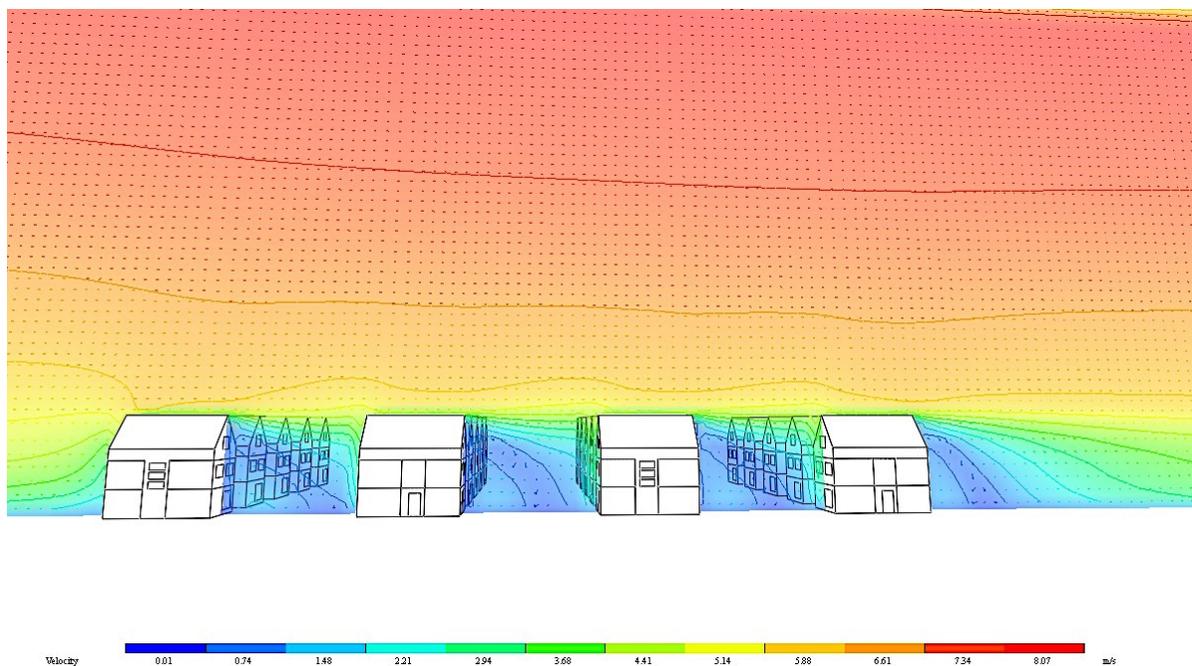


Figura 5.3: Vista lateral del conjunto, para viento predominante de forma frontal a fachadas (Cv-A). MicroFlo, IESVE.

Por otra parte, sobre el área de la cumbrera se aprecia que el flujo se presenta de forma laminar y que mantiene la velocidad en el rango de los 6,61 m/s, a excepción de una zona de entre 20 y 30 cm aproximadamente de la superficie de la cumbrera en que la velocidad disminuye producto de la resistencia generada por esta última (vista acercada en figura 5.4).

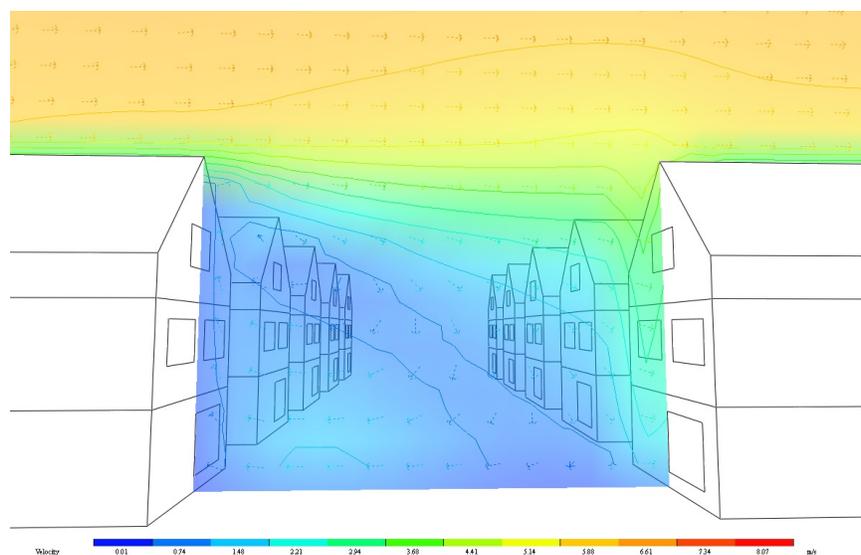


Figura 5.4: Vista lateral acercada, viento predominante de forma frontal a fachadas. (Cv-A). MicroFlo, IESVE.

Los datos expuestos tras esta primera simulación, nos permiten establecer en primera instancia que, a partir de la turbulencia y disminución de la velocidad experimentada por el flujo entre las viviendas, el potencial de ventilación a través de las fachadas, queda disminuido en comparación con la condición de estabilidad de flujo y velocidad con que cuenta el área sobre la cumbrera. Esto último permite sostener la potencialidad de un sistema que capte el flujo del aire a esta altura y que lo dirija al interior de la vivienda. Por otro lado, a partir de estos hallazgos se pueden establecer los perfiles de exposición para las aperturas a considerar como dato de entrada en las evaluaciones internas a desarrollar en capítulo 6, lo cual para el caso de ventanas correspondería la opción de protegido.

Cv-B: análisis externo para el conjunto de viviendas (viento de forma lateral a fachadas, velocidad de viento de 7,7 m/s.)

En la segunda simulación Cv-B, (figura 5.5) correspondiente al conjunto de viviendas con viento predominante de forma lateral a las fachadas, se repitió el fenómeno de la disminución de velocidad y turbulencia del flujo entre viviendas experimentado en la simulación anterior. Sin embargo, a diferencia del primer caso, la caída de velocidad del aire para la fachada lateral, presentó una disminución, que fue del rango de 5,7 m/s a los 2,23 m/s.

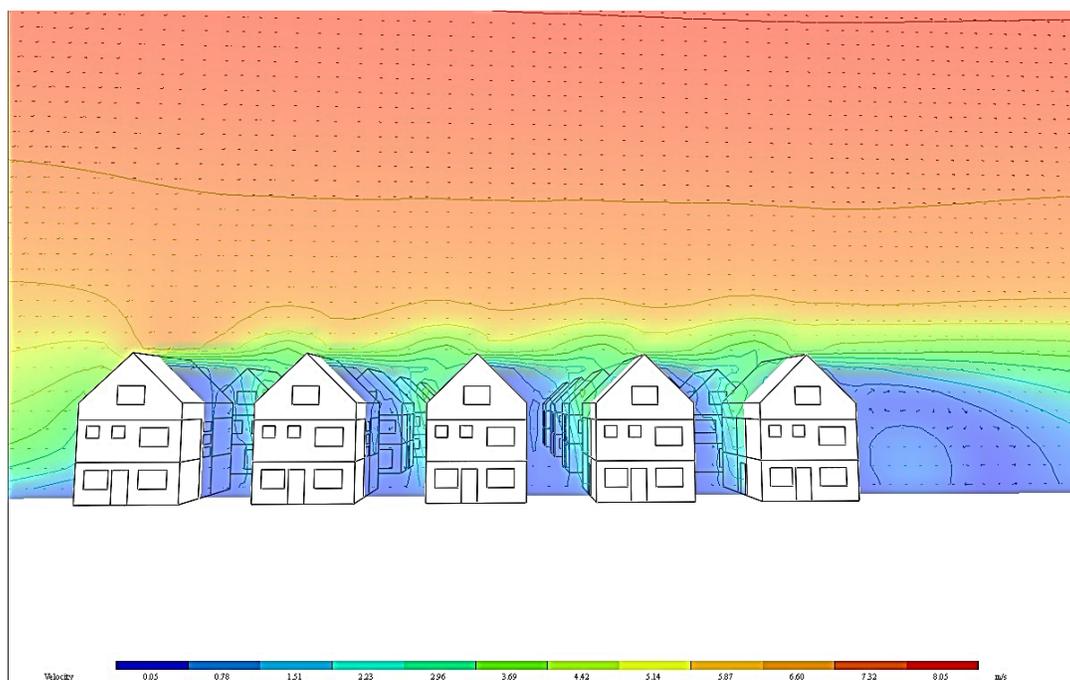


Figura 5.5: Vista frontal del conjunto, para flujo de viento predominante de forma lateral a fachadas (Cv-B). MicroFlo, IESVE.

Además, se apreció un comportamiento turbulento del flujo en la zona situada sobre las cubreras, lo cual no solo disminuye la velocidad, sino que también da inestabilidad a los flujos (figura 5.6). Lo anterior puede atribuirse como consecuencia de la menor distancia entre viviendas y al tipo de obstáculo que representan las techumbres en sentido perpendicular al flujo del viento.

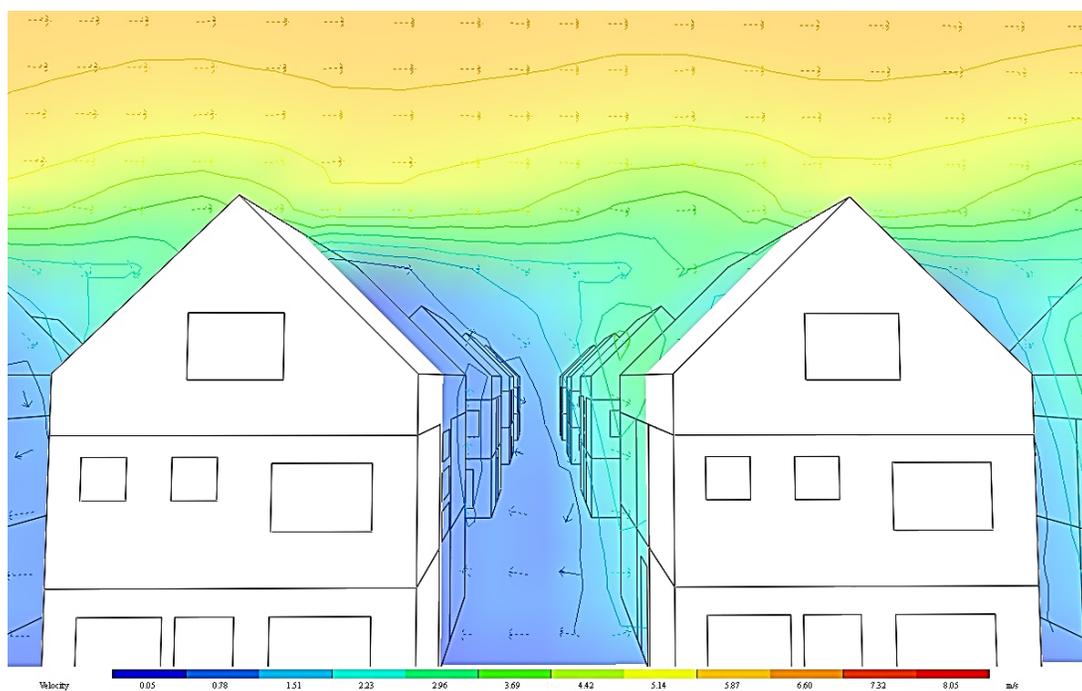


Figura 5.6: Vista frontal acercada, viento predominante de forma lateral a fachadas. (Cv-B). MicroFlo, IESVE.

Cv-AWC: análisis externo para el conjunto de viviendas con Windcatchers incorporado (viento de forma frontal a fachadas, Velocidad de viento de 7,7 m/s)

El caso Cv-AWC, que considera las viviendas con las fachadas frontales orientadas en dirección del flujo de viento predominante, además cuenta con la incorporación de un Windcatcher cuadrado Classic 95 (figura 5.7), instalado en la parte superior de la cubierta, donde se extendió el ducto o cuello del windcatcher, con el propósito de elevar la zona de captación y evacuación (celosías exteriores) por sobre

30 cm de la cumbrera. Esto último con el fin de no situarse en la zona de ésta última que presenta disminución en la velocidad del flujo, de acuerdo a lo visualizado en la simulación del caso Cv-A.

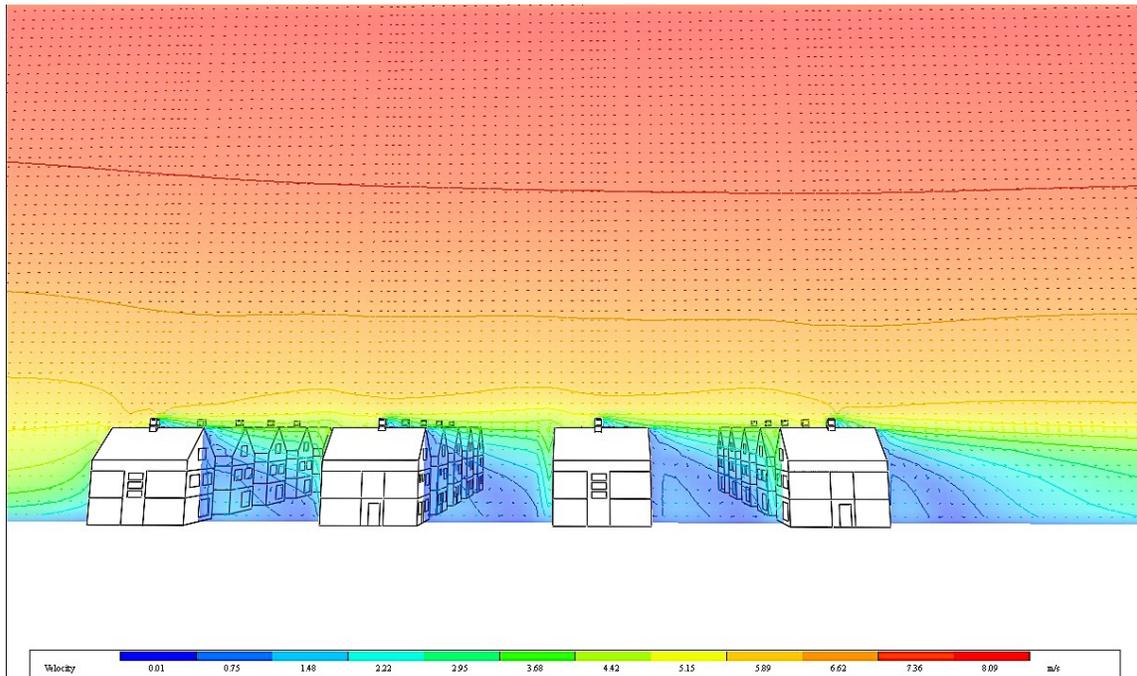


Figura 5.7: Vista lateral del conjunto, para viento predominante de forma frontal a fachadas (caso estudio Windcatcher incorporado). (Cv-AWC). MicroFlo, IESVE.

Los resultados de la simulación Cv-AWC presentaron disminución de la velocidad e inestabilidad del flujo entre viviendas, generando para la zona de la fachada expuesta frontalmente al viento, una caída de la velocidad de 5,89 m/s a 2,89 m/s, mientras que el área de exposición a los vientos por parte del Windcatcher se enfrentó a velocidades de 5,89 m/s, lo cual garantiza la posibilidad de captación de aire a mayor velocidad para ingresarlo a la vivienda (figura 5.8). Finalmente, se puede visualizar que el distanciamiento entre viviendas permite la estabilización del flujo tras el paso del viento por el Windcatcher de la vivienda vecina.

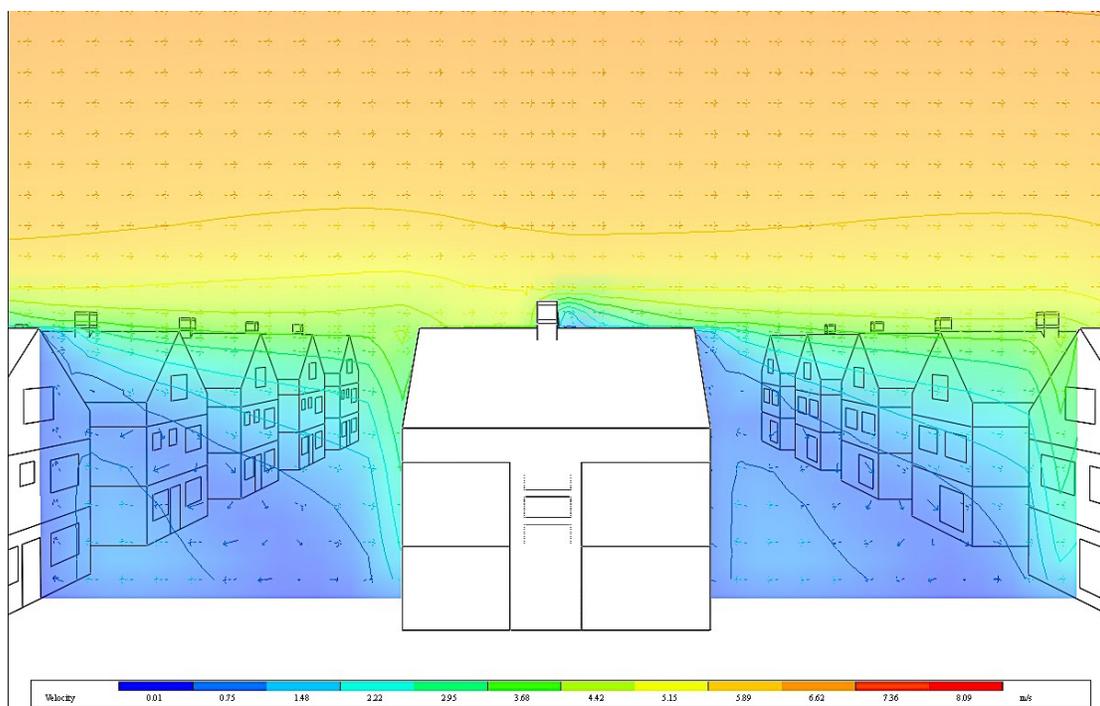


Figura 5.8: Vista lateral acercada, viento predominante de forma frontal a fachadas. (Cv-AWC). MicroFlo, IESVE.

Cv-BWC: análisis externo para el conjunto de viviendas con Windcatcher incorporado (viento de forma lateral a fachadas, velocidad de viento de 7,7 m/s)

La cuarta simulación Cv-BWC, correspondió a la incorporación de Windcatchers a las viviendas del conjunto que enfrentan sus fachadas laterales a los vientos predominantes (figura 5.9). De la misma manera que el caso Cv-B, la velocidad del viento disminuyó entre viviendas, sumado al comportamiento irregular del flujo en la zona superior de las cubreras. Esto último, si bien disminuyó la velocidad del viento e inestabilidad los flujos para esta zona, es algo manejable a la hora de incorporar un Windcatcher, ya que al ubicar las celosías de captación y evacuación de aire por sobre los 30 cm de la cumbrera se retoma la velocidad de flujo.

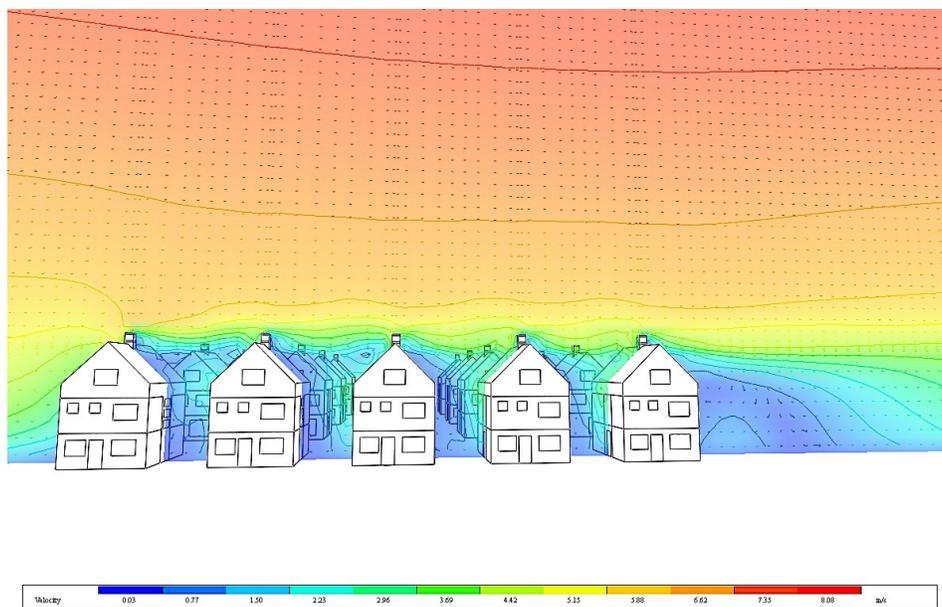


Figura 5.9: Vista frontal del conjunto, para flujo de viento predominante de forma lateral a fachadas (caso estudio Windcatcher incorporado). (Cv-BWC). MicroFlo, IESVE.

Sin embargo, el problema se genera cuando todas las viviendas cuentan con un Windcatcher en la misma posición, dado que la cercanía de las viviendas y la desviación en el flujo producido por la orientación de la techumbre respecto al viento, genera una disminución notable en la velocidad de viento incidente en el Windcatcher (2,96 m/s), y por defecto, su motor de ventilación para el sistema (figura 5.10).

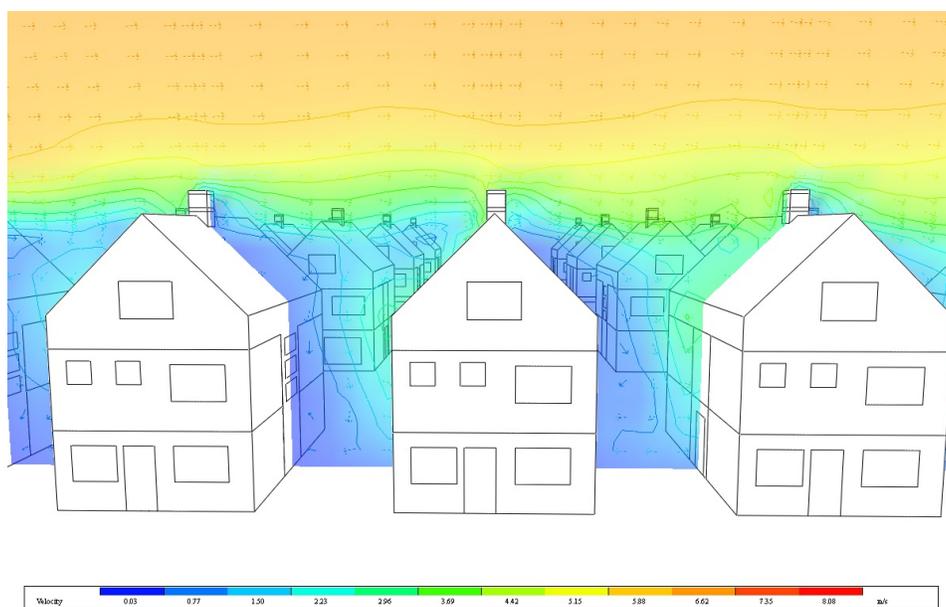


Figura 5.10: Vista frontal acercada, viento predominante de forma lateral a fachadas. (Cv-BWC). MicroFlo, IESVE.

Cv-BWC(a): análisis externo para el conjunto de viviendas con Windcatcher incorporado a una sola vivienda (viento de forma lateral a fachadas, Velocidad de viento de 7,7 m/s)

Ante el comportamiento de los flujos en la zona de captación del Windcatcher visualizado en la evaluación Cv-BWC, es que se planteó una simulación adicional “Cv-BWC(a)” que es una variación del modelo Cv-BWC, pero con la diferencia que no considera Windcatchers en las viviendas próximas (figura 5.11). Si bien esta característica no cambia las condiciones del viento y estabilidad de flujo entre viviendas, permite la mejora de la exposición a los vientos por parte del área de celosías de captación del Windcatcher, consiguiendo una velocidad de flujo del rango de los 5,0 m/s (figura 5.12) al no tener Windcatcher en la misma ubicación las casas vecinas.

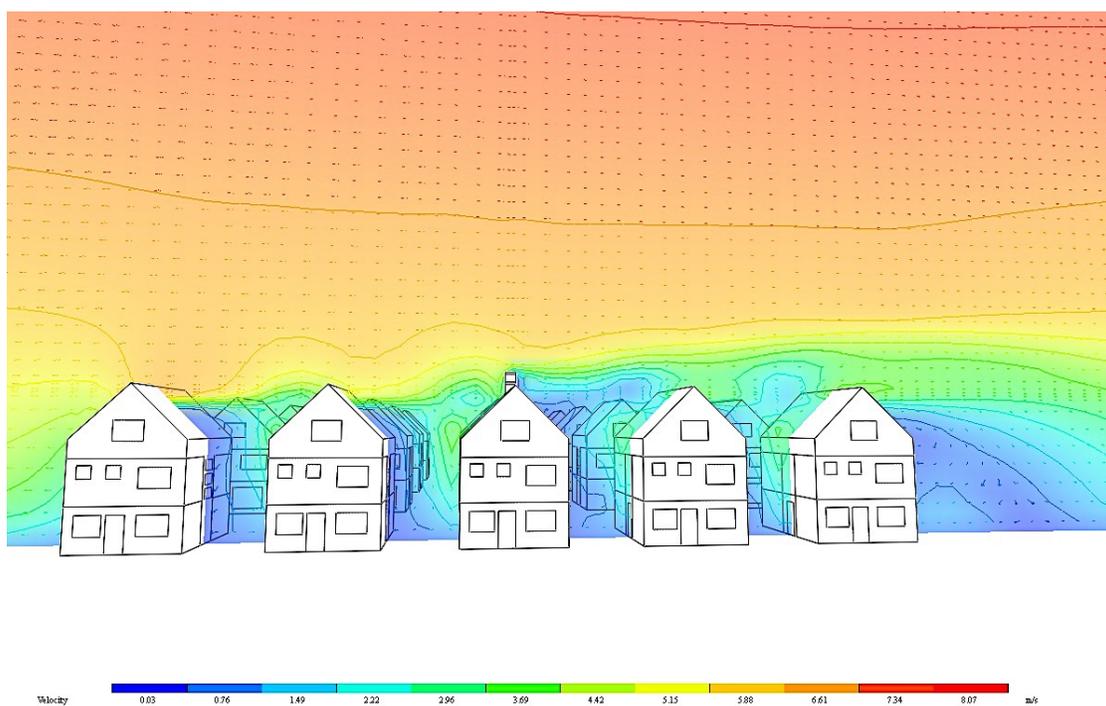


Figura 5.11 : Vista frontal del conjunto, para flujo de viento predominante de forma lateral a fachadas (Windcatcher incorporado a una sola vivienda del conjunto). (Cv-BWC(a)). MicroFlo, IESVE.

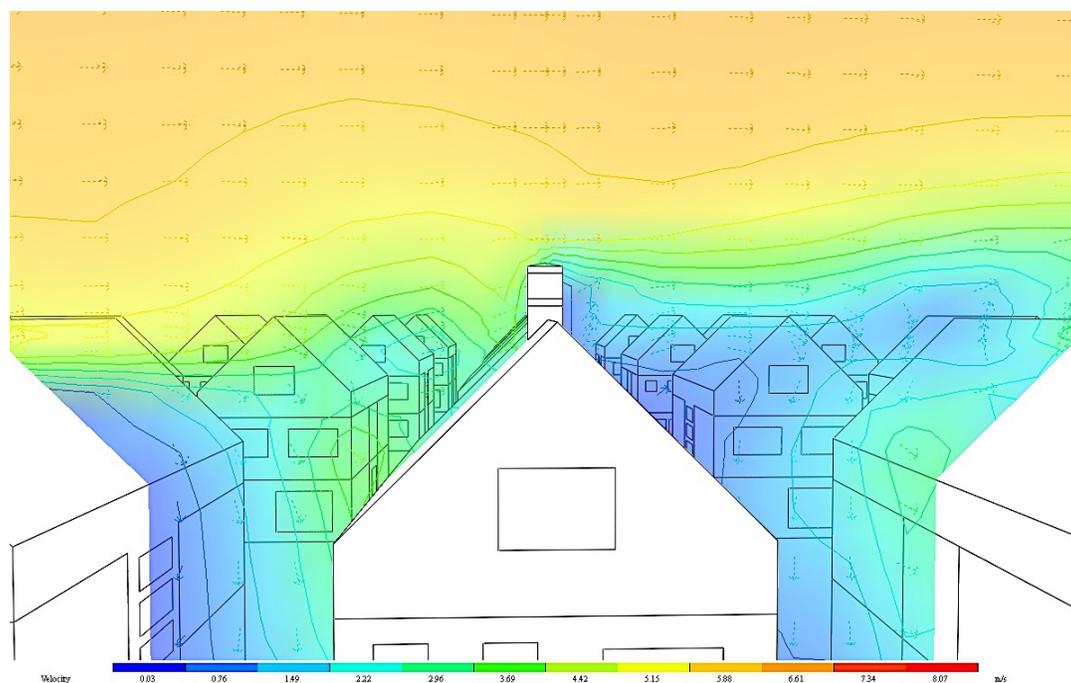


Figura 5.12: Vista frontal acercada, viento predominante de forma lateral a fachadas. (Cv-BWC(a)). MicroFlo, IESVE

5.6 Conclusiones capítulo 5

Las simulaciones realizadas a la vivienda agrupadas como conjunto frente a los vientos predominantes en estaciones cálidas, permitieron constatar y establecer las condiciones disponibles de ventilación natural para el caso de estudio y al mismo tiempo proyectar el potencial de ventilación entregado por un Windcatcher. Si bien el software de análisis tiene la limitación de no entregar valores numéricos tabulados para establecer la dirección y velocidad del flujo del aire externo, cumple con entregar rangos de valores a partir de resultados gráficos que permitieron levantar escenarios de ventilación para las evaluaciones internas del caso de estudio. Esta condición del software hizo posible realizar el análisis de configuración de conjuntos residenciales y de exposición de viviendas como unidades, con una herramienta que presenta un costo económico y tiempos de operación mucho más reducidos que otras opciones de análisis. Lo anterior se presenta como una oportunidad respecto a los constantes cambios que demandan los conjuntos habitacionales en las primeras etapas de diseño, ofreciendo resultados oportunos frente a cada cambio que experimente el proyecto.

Dentro de los hallazgos generados en las primeras evaluaciones exteriores (Cv-A y Cv-B) correspondientes al caso de estudio sin la incorporación de Windcatcher, se comprobó lo planteado por Etheridge (2012), 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. De esta manera, la evaluación del conjunto realizada con MicroFlo permitió además cuantificar la velocidad del viento para un escenario particular, el cual, para una situación de velocidad de viento de 7,7 m/s, arrojó para el espacio entre viviendas una disminución del rango de 6,61 m/s a 2,21 m/s para el caso "CV-A" y de 5,87 m/s a los 2,23 m/s para el caso "CV-B". Esto deja en evidencia que, a partir de la turbulencia y disminución de la velocidad experimentada por el flujo entre las viviendas, el potencial de ventilación queda disminuido en comparación con la condición de estabilidad de flujo y velocidad con que cuenta la zona sobre la cumbrera.

Si bien, la zona de la cumbrera se establece como el punto de mayor exposición, para de posicionar el Windcatcher, es necesario extender su ducto o cuello, con objeto de que el área de captación y evacuación (celosías externas) se eleve a 30 cm por sobre la cumbrera. Dicha medida fue establecida en el análisis del flujo de viento en las evaluaciones Cv-A y Cv-B, donde se logró visualizar que sobre un rango de 30 cm de la superficie de la cumbrera, el flujo se torna laminar y mantiene su velocidad, mientras que bajo este rango, la velocidad disminuye, producto de la resistencia generada por la cumbrera. De esta manera se evaluó el Windcatcher para viviendas cuyas fachadas frontales enfrentaban el viento predominante, a través de Cv-AWC, en cambio, para las viviendas cuyas fachadas laterales enfrentaban el viento, se evaluó mediante Cv-BWC. La primera evaluación, correspondiente a Cv-AWC, arrojó que el Windcatcher quedó expuesto a vientos del rango de los 5,89 m/s, a diferencia de las ventanas del ático, que quedaron expuestas a 2,89 m/s, lo que significa un aporte significativo. Por otra parte, se pudo interpretar que los Windcatcher instalados en viviendas aledañas, no afectaban la exposición al flujo de viento para Windcatcher vecinos; debido a la distancia existente entre viviendas para esta orientación. Por el contrario, en el caso Cv-BWC si fue afectado el flujo recibido, por la presencia de Windcatcher en las viviendas vecinas, ya que la escasa distancia entre unidades, sumada a la desviación en el flujo producido por la orientación de la techumbre respecto al viento, generó una disminución notable en la velocidad de viento percibida por el Windcatcher, la cual llegó a 2,96 m/s. En consecuencia a esto último, se realizó una evaluación adicional "Cv-BWC(a)" la cual no consideró

Windcatcher en las casas vecinas, para la misma dirección del viento. Permitiendo de este modo mejorar el desempeño del Windcatcher, ya que este logró enfrentar una velocidad de viento del rango de 5,0 m/s, sustancialmente mejor que la opción con Windcatcher en las casas vecinas.

Otro hallazgo de valor tras la evaluación exterior, es la definición de los coeficientes de presión para las aberturas en fachadas, 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 de IESVE (responsable de evaluar la viabilidad de las estrategias de ventilación natural) asigna a los coeficientes de presión obtenidos en experimentos de túnel de viento para varios tipos de superficie de acuerdo a rangos de direcciones de viento (IES Virtual Environment. 2015 b). 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. Dichos tipos de exposición se traducen en las categorías "expuesto", "semi-expuesto" y "protegido" según sean los grados de protección que tenga el edificio con respecto a otros edificios circundantes u otras 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 en MicroFlo y sumado al efecto de turbulencia planteado por Etheridge (2012), es que es posible utilizar con certeza el tipo de exposición "protegido" para efecto de las ventanas en la evaluación interior. Todo lo cual se ajusta a los criterios de MacroFlo para la categoría de "protegido" puesto que esta es designada cuando las obstrucciones circundantes son de altura similar al edificio en cuestión. Por último, según las velocidades obtenidas en la evaluación exterior, es posible también asignar al Windcatcher la categoría de "expuesto" ya que según MacroFlo esta denota un edificio o elemento de pie en un terreno abierto sin obstrucciones cerca.

Capítulo 6

Evaluación del impacto del Windcatcher en las temperaturas interiores del ático

Esta fase de análisis se concentra en la vivienda como unidad, particularmente en el ático como área de estudio, evaluando el desempeño de la ventilación natural a partir de la incorporación del Windcatcher como estrategia de control de las temperaturas operativas y por consiguiente en el confort térmico resultante para sus ocupantes.

En este capítulo se presentan las condiciones de la modelación y los parámetros incorporados como datos de entrada para la simulación térmica dinámica que permitieron llevar a cabo la evaluación del ambiente interior de la vivienda. Entre los datos incorporados, se consideran las condiciones de exposición a los vientos para las ventanas y el Windcatcher, obtenidos en la evaluación exterior (capítulo 5).

Las primeras evaluaciones se centrarán en el impacto de la orientación de la vivienda frente a los vientos predominantes, lo cual permitirá tener en cuenta los flujos de aire disponibles al interior del ático, a partir de la abertura de ventanas y la acción del Windcatcher.

La segunda etapa de evaluaciones se enfocará en las temperaturas operativas registradas al interior del ático, a partir del desarrollo de una matriz de evaluación (punto 3.6.3) que contempla no solo la orientación de la vivienda, sino que considera variantes de subdivisión al interior del ático y al mismo tiempo distintas opciones de abertura de puertas y ventanas. Todo lo anterior será parte de las variables del caso base, que será contrastado con el caso con Windcatcher incorporado. Finalmente, las temperaturas operativas obtenidas, serán incorporadas en un análisis de confort térmico, como parámetro de evaluación.

6.1 Definición del modelo 3D y proceso de simulación

A partir del caso de estudio seleccionado y caracterizado en el capítulo 4 de la presente investigación, se desarrolló el modelo simplificado tridimensional de la vivienda, que permitió llevar a cabo las simulaciones termo-dinámicas necesarias para los objetivos propuestos. Dicho modelo, proveniente de una vivienda de 136 m² desarrollada en 2 niveles más una tercera planta de ático, fue levantado en razón de la información planimétrica y las especificaciones técnicas del proyecto de arquitectura. El proceso de modelado, fue realizado en ModelIT, que es el componente para la construcción de modelos 3D del entorno virtual de la suite del software IES (Integrated Environmental Solutions - Virtual Environment). Si bien, ModelIT se utilizó como base, tanto para las evaluaciones interiores como las exteriores (capítulo anterior), cabe destacar que, por la naturaleza del análisis interior, se requiere un mayor ingreso de datos y especificaciones. Considerando en primera instancia, la generación de zonas o habitaciones interiores con su respectivas configuraciones y conexiones inter-zonales, para luego configurar las aberturas (puertas, ventanas y vanos) interiores y exteriores del modelo (figura 6.1).

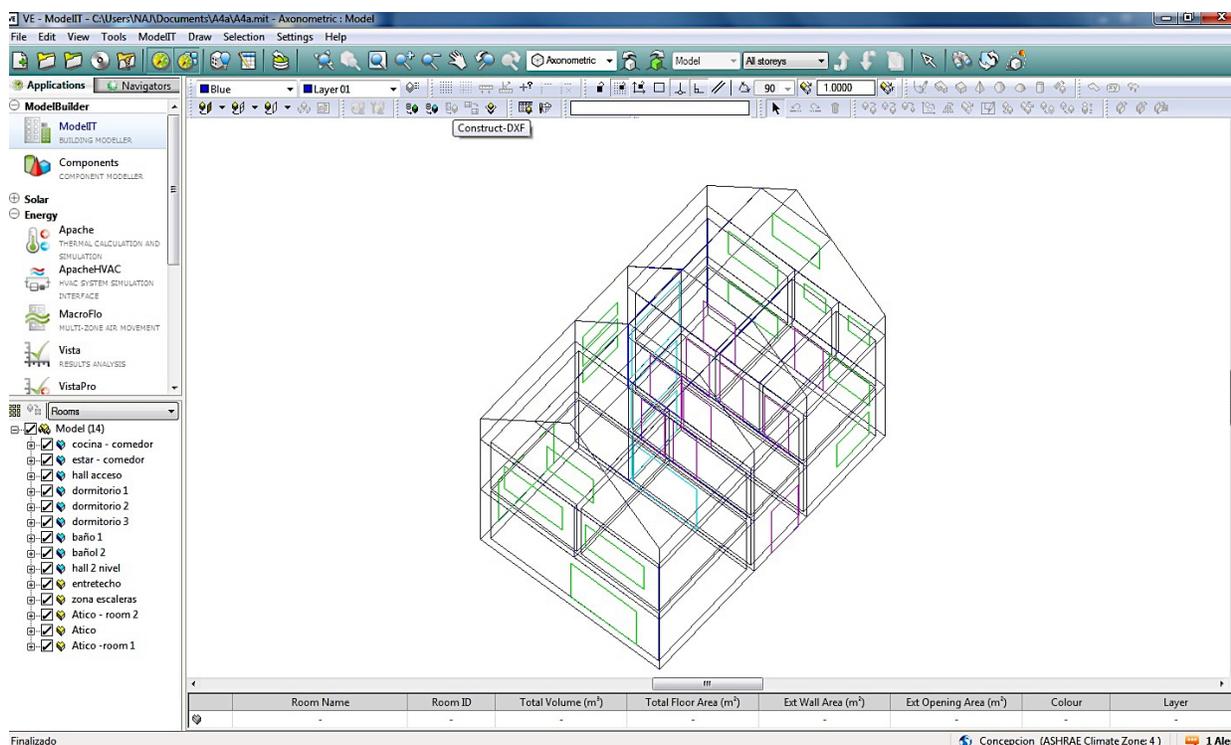


Figura 6.1: Modelación de la vivienda (caso de estudio) a través del componente de construcción de modelos de IESVE, ModelIT.

Una vez realizado el modelo 3D, se ingresan los parámetros de simulación o datos de entrada que demanda el análisis, asociados principalmente a las propiedades físico constructivas del edificio, el funcionamiento y las condiciones climáticas en que se sitúa. Estos datos serán demandados por las evaluaciones proyectadas, siendo detallados con mayor precisión el punto 6.2 “datos de entrada simulación interior”.

La evaluación, que estará centrada en el comportamiento de los flujos de aire ingresados al modelo (6.3), se desarrollará en el simulador para diseño y evaluación de edificios con ventilación natural y modo mixto “MacroFlo”, que forma parte de la suite del software IES, detallado en el capítulo de metodología. Dicho simulador 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, permitiendo 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. Respecto a los resultados, MacroFlo entrega valores tabulados, como también gráficos, estos últimos por medio de flechas que representan los flujos de aire por habitación. Además, los cálculos son integrados al simulador central de la suite de IESVE, consiguiendo resultados del rendimiento térmico a partir del desempeño de la ventilación natural.

En cuanto a la evaluación térmica del ambiente interior (6.4), ésta se genera en la aplicación “Apache”, correspondiente al procesador central de simulación térmica de la suite, la cual considera como condiciones de arranque los datos de entrada expuestos en el punto (6.2). Por su parte Apache es complementado con las aplicaciones de IES mencionadas en punto (3.3.1) del capítulo 3. La evaluación como tal, se desarrolla como una simulación termo-dinámica, que permite conocer la reducción o el aumento de las temperaturas del aire interior en el ático, a medida que se modifican las estrategias de ventilación natural.

6.2 Datos de entrada simulación interior

6.2.1 Datos climáticos

Tomando en consideración la caracterización climática del lugar de estudio, desarrollada en el capítulo 4, se ingresaron de los datos climáticos necesarios para la simulación dinámica del caso de estudio. Para

ello se utilizó el editor de clima y ubicación de lugar llamado “ApLocate”, que posee el simulador central. En este caso se incorporó el archivo climático para la ciudad de Concepción (CHL_Concepcion.856820_IWEC.epw) disponible en la base de del software EnergyPlus. El cual consiste en representaciones de años típicos, derivado de hasta 18 años de observaciones (1982-1999), los cuales, si bien no considera los peaks de años calurosos, permite ajustarse a las condiciones climáticas promedio a largo plazo.

Con el fin de comprobar la idoneidad del archivo climatológico incorporado a la simulación, se comparó con una base de datos climática normalizada. Por esto se utilizó la NCh1079 - 2008, que proporciona datos climáticos para las principales ciudades del país, entre ellas Concepción, a través de la estación meteorológica Carriel sur. Finalmente, se realizó el contraste de datos, utilizando el software “Climate Consultant 6.0” para visualizar los valores del archivo climático epw y situarlos respecto a los dictados por la norma.

Tabla 6.1: Visualización de los datos climáticos del archivo CHL_Concepcion.856820_IWEC.epw a través del software Climate Consultant.

WEATHER DATA SUMMARY													LOCATION: CONCEPCION, -, CHL
													Latitude/Longitude: 36.77° South, 73.05° West, Time Zone from Greenwich -4
													Data Source: IWEC Data 856820 WMO Station Number, Elevation 16 m
MONTHLY MEANS	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	
Global Horiz Radiation (Avg Hourly)	537	506	405	307	188	161	182	236	334	414	467	520	Wh/sq.m
Direct Normal Radiation (Avg Hourly)	483	500	372	284	147	129	156	181	284	344	363	445	Wh/sq.m
Diffuse Radiation (Avg Hourly)	172	147	159	147	119	107	113	142	159	170	193	183	Wh/sq.m
Global Horiz Radiation (Max Hourly)	1054	1019	904	738	569	444	507	663	819	978	1045	1057	Wh/sq.m
Direct Normal Radiation (Max Hourly)	948	962	886	819	765	672	695	802	873	912	931	934	Wh/sq.m
Diffuse Radiation (Max Hourly)	497	475	427	390	265	227	264	357	415	479	562	551	Wh/sq.m
Global Horiz Radiation (Avg Daily Total)	7642	6816	4948	3401	1890	1539	1788	2521	3951	5403	6533	7534	Wh/sq.m
Direct Normal Radiation (Avg Daily Total)	6888	6733	4540	3155	1470	1232	1526	1936	3349	4507	5080	6449	Wh/sq.m
Diffuse Radiation (Avg Daily Total)	2454	1980	1950	1628	1193	1025	1114	1518	1880	2221	2699	2654	Wh/sq.m
Global Horiz Illumination (Avg Hourly)	58080	54900	44148	33580	20772	17752	19978	25916	36504	45149	50803	56506	lux
Direct Normal Illumination (Avg Hourly)	47497	49361	36072	26714	13533	11664	14295	17021	27454	33653	35589	43600	lux
Dry Bulb Temperature (Avg Monthly)	17	16	15	13	11	9	9	10	10	12	14	16	degrees C
Dew Point Temperature (Avg Monthly)	11	11	11	11	9	7	6	7	7	9	10	11	degrees C
Relative Humidity (Avg Monthly)	74	76	79	87	88	88	85	83	80	83	77	77	percent
Wind Direction (Monthly Mode)	230	210	210	220	190	140	180	0	240	220	210	230	degrees
Wind Speed (Avg Monthly)	4	4	3	3	3	3	3	4	4	3	4	4	m/s
Ground Temperature (Avg Monthly of 3 Depths)	15	15	14	14	12	11	10	10	10	11	12	13	degrees C

Tabla 6.2: Valores promedio de variables climatológicas, para los meses cálidos en la ciudad de Concepción, según la NCh 1079 Of 2008.

Mes	Temperatura del aire media (°C)	Radiación global med. (Wh/m2 mes)	Humedad relativa (%)	Dirección viento predominante	Velocidad viento predominante
Enero	16,3	6947	75	SW	7,7
Febrero	15,7	5971	78	SW	7,2
Marzo	13,9	4578	81	SW	6,2

Al comparar los datos del archivo epw (tabla 6.1) y los dictados por la NCh 1079 - 2008 (tabla 6.2), se estableció similitud entre los valores, y por defecto la aceptabilidad del archivo climático epw para llevar a cabo el análisis. Si bien, es reconocible la diferencia entre los valores, ésta se considera aceptable, dada la naturaleza de selección de ambas bases de datos. En consideración a que la selección de datos del archivo epw se basa en la representación de un año típico y la base de la NCh 1079 - 2008 que define a partir del promedio de los valores climáticos. Teniendo ambas bases, años de recolección de datos distintas.

Escenario climático de análisis

Para efectos de las evaluaciones, de acuerdo a la metodología planteada, se estableció un escenario climático representativo que actúe como base para el contraste de las múltiples variables de uso y diseño a las que se someterá el caso estudio. Por ello se consideró como periodo de análisis un día completo, con el fin de seguir el comportamiento de los usuarios frente a las condiciones climáticas a lo largo de la jornada. Como criterio principal se contemplaron las temperaturas elevadas, dado que éstas ocasionan la problemática de calentamiento al interior de la vivienda, y por efecto, las demandas de ventilación. De esta manera se determinó el mes de enero como escenario de análisis, por ser el que registra mayores temperaturas del aire de la estación cálida en el 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, que cuenta con una temperatura máxima de 25°C, una velocidad de viento máxima de 9,3 m/s para una dirección de viento sur-poniente predominante (tabla 6.3)

Tabla 6.3: Condiciones para el día seleccionado como escenario climático (17 de enero), establecidas a partir del archivo climático CHL_Concepcion.856820_IWEC.epw

Hora	T°. aire bulbo seco (° C)	Humedad relativa (%)	Velocidad viento (m/s)	Dirección viento (deg.)	Radiación global (W/m ²)	Radiación difusa (W/m ²)
0:00	16.00	74.0	3.60	210.0	0.000	0.000
1:00	15.00	77.0	2.10	210.0	0.000	0.000
2:00	15.00	77.0	2.10	200.0	0.000	0.000
3:00	13.40	83.0	1.50	200.0	0.000	0.000
4:00	13.00	82.0	1.50	210.0	0.000	0.000
5:00	12.00	88.0	0.00	0.0	0.000	0.000
6:00	12.50	77.0	0.00	0.0	0.000	0.000
7:00	13.00	58.0	0.00	0.0	40.309	39.000
8:00	13.00	62.0	2.60	180.0	215.615	131.000
9:00	15.10	56.0	4.60	210.0	440.928	169.000
10:00	17.00	63.0	3.60	230.0	662.070	173.000
11:00	20.00	46.0	4.60	230.0	845.548	167.000
12:00	21.00	48.0	5.90	230.0	973.613	176.000
13:00	22.00	43.0	7.20	220.0	1.038.382	163.000
14:00	25.00	39.0	7.70	230.0	1.034.165	181.000
15:00	25.00	43.0	8.20	230.0	970.849	163.000
16:00	25.00	47.0	8.70	230.0	836.482	175.000
17:00	24.50	46.0	9.00	230.0	648.102	171.000
18:00	24.10	48.0	9.30	220.0	446.037	136.000
19:00	22.50	52.0	8.00	220.0	225.074	120.000
20:00	21.00	56.0	6.70	230.0	46.323	43.000
21:00	18.80	64.0	4.60	230.0	0.000	0.000
22:00	17.00	72.0	3.60	220.0	0.000	0.000
23:00	15.00	82.0	3.10	220.0	0.000	0.000

6.2.2 Propiedades físicas - constructiva de los materiales

Las soluciones constructivas consideradas para el modelo de simulación, corresponden a lo especificado en la caracterización del caso de estudio en el capítulo 4 de la presente tesis. Por otro lado, las propiedades termo-físicas de los materiales involucrados (tabla 6.4), son ingresados al simulador central “Apache” del software. Para lo cual se detallaron capa por capa los materiales que forman la solución constructiva, tomando en cuenta las propiedades térmicas del elemento (4.3.4) y los datos de adyacencia que describen las condiciones térmicas de borde. De esta manera las propiedades termo-físicas de los materiales, así como la capacidad de absorción solar y emisividad de las superficies, serán

extraídas de listados normados, o bien, de las especificaciones técnicas de los fabricantes, con el fin de contextualizar esta información a la realidad local del caso de estudio. Utilizando las bases de datos de software (IES Virtual Environment. 2015 c) para el caso de no contar con información por parte de las fuentes locales.

Tabla 6.4: Tabla resumen soluciones constructivas con sus espesores totales y valores U, ingresados en Apache.

ID	Category	Description	Data source	U value (W/m²K)	Thickness (mm)	Notes etc.
STEELP	External Wall	Muro exterior albañilería	Generic	1.3255	180.000	
C12	Internal Ceiling/Floor	Cielo ático	Generic	0.3878	110.000	
C13	Internal Ceiling/Floor	Entrepiso madera	Generic	1.7411	180.000	
STD_CEIL	Internal Ceiling/Floor	Losa entrepiso H.A.	Generic	2.6589	126.500	
WALL11	Ground/Exposed Floor	Monodraught GRP WINDCATCHER Exposed Floor	Generic	4.9029	3.000	
WALL	External Wall	Monodraught GRP WINDCATCHER External Wall	Generic	6.1845	3.000	
STD_WAL1	External Wall	Muro exterior liviano (madera)	Generic	0.5871	110.000	
STD_PART	Internal Partition	Muros divisorios interiores, albañilería ladrillo	Generic	1.8138	144.000	
P23	Internal Partition	Muros divisorios interiores, livianos (madera)	Generic	2.0144	120.000	
STD_FLO1	Ground/Exposed Floor	Pavimento primer nivel	Generic	0.8054	210.196	
STD_DOOR	Door	Puertas	Generic	2.0167	45.000	
R16	Roof	Techumbre entretecho	Generic	3.8338	18.500	
STD_ROOF	Roof	Techumbre principal	Generic	0.3565	168.500	
STD_EXTW	External Window	Ventanas - aluminio	Generic	3.2346	22.000	

6.2.3 Condiciones de exposición al viento y valores de infiltración

A partir de lo expuesto en el capítulo 3.3.1 de la presente tesis, MacoFlo actúa como la aplicación responsable de la integración del aporte de la ventilación natural al simulador central, canalizando los datos de entrada de ventilación e infiltraciones para la evaluación del ambiente interior. Sumado a esto se incluyen los hallazgos del capítulo 5, referidos a los tipos de exposición experimentados por el caso de estudio frente a los flujos de viento locales. En el caso de las fachadas, se determinó el tipo de exposición “protegido”, correspondiente según los criterios de MacroFlo, para cuando las obstrucciones circundantes son de altura similar al edificio en cuestión. Mientras que para el Windcatcher se estableció la categoría de “expuesto” que denota un elemento de pie en un terreno abierto sin obstrucciones cerca. Todo lo anterior inscrito en las condiciones del caso de estudio respecto al terreno circundante, que para este caso corresponde al tipo de terreno de “Suburbio” ingresado en la aplicación APlocate del software,

la cual basa su definición de categorías y perfiles de exposición según lo establecido por ASHRAE Handbook of Fundamentals (2001).

De esta manera MacroFlo calcula dinámicamente las presiones del viento incidentes en el modelo a partir de la lectura del archivo climático ingresado, combinando los datos de velocidad y dirección de viento con la información incorporada referente a orientación de aberturas y exposición al viento. Dicho cálculo implica coeficientes de presión de viento derivados de experimentos en túnel de viento, tomados por MacroFlo de la guía AIVC (Air Infiltration & Ventilation Center, 1999).

Por otro lado, los datos de infiltración, fueron ingresados en la opción “Air Exchange” del simulador central Apache, que contempla la entrada de datos para especificar la infiltración y ventilación de la habitación. Para el caso de estudio, se prescindió de la ventilación auxiliar (mecánica), dejando abierto el uso de ventilación natural a partir del ingreso de datos en la aplicación MacroFlo. En relación al aire sin control que pueda ingresar al ambiente interior de la edificación, ya sea por grietas y/o aberturas de la envolvente, el simulador central de IES considera un valor por infiltración de aire que puede ser ingresado como: l/s, l/(s*m²), l/s/persona o ACH (Air Changes per hour). En el caso de estudio base, por tratarse de una vivienda de estándar medio-alto se ingresó un valor por infiltración de 0,6 ACH, que fue aplicado a todas las habitaciones que conforman el modelo.

6.2.4 Perfil de ocupación

El perfil de ocupación incorporado a la simulación se definió diferenciando entre días hábiles y fines de semana. Para los primeros, se estableció en una jornada laboral de 9 horas, que representa la fracción diaria de la jornada semanal de 45 horas establecida por la Dirección del Trabajo de Chile. A este periodo, se sumó por efectos de traslado, 1 hora al inicio de la jornada y 1,5 horas al retorno al hogar. De esta manera, se definió un rango de ausencia en el hogar desde 7:30 h hasta las 19:00 h. Esto se asumió para todo el núcleo familiar, considerando las jornadas académicas y actividades extra programáticas de los hijos.

Para el caso de los fines de semana y los días feriados, se consideró mayor permanencia en los hogares, estableciendo un periodo de ausencia desde las 16:00 h hasta las 19:00 h, como rango promedio para eventuales actividades fuera de casa.

6.2.5 Perfil de abertura de ventanas

En base al perfil ocupación definido para la simulación, se determinaron dos variantes. Una que considera las “ventanas cerradas” en el periodo de ausencia de los moradores, para luego abrirlas a su llegada desde las 19:00 h y cerrarlas a las 21:00 h, este perfil responde principalmente a temas de seguridad, ver punto (2.2.6). En contraste, la otra alternativa contempla la opción de “ventanas abiertas” desde la hora de salida a la jornada laboral, es decir las 07:30 h, hasta las 21:00 h.

Por otro lado, para el caso de los fines de semana y días feriados, con un rango de ausencia entre las 16:00 h. hasta 19:00 h, se supone para la variante de “ventanas cerradas”, dos horarios de abertura de ventanas: desde 11:00 h a las 16:00 h y desde las 19:00 h a las 21:00 h. Por su parte, la variante que considera “ventanas abiertas” en ausencia de los moradores, establece la apertura de ventanas desde las 11:00 h hasta las 21:00 h (tabla 6.5).

En coincidencia con otras evaluaciones de viviendas en entornos urbanos Mavrogianni et al. (2012) no se contempla apertura de ventanas en la noche, por motivos de seguridad, intrusión de insectos y exposición a ruidos. Definiendo las 21:00 h como hora de cierre de ventana para todos los casos en los meses cálidos, que requieran enfriamiento (diciembre, enero, febrero y marzo).

Tabla 6.5: Variables de aberturas de ventanas en relación a los periodos de ausencia de los ocupantes.

Días de la semana	Horario ausencia ocupantes	Horario abertura "variable ventanas cerradas"	Horario abertura "variable ventanas abiertas"
Lunes - viernes	7:00 - 19:00 h	19:00 - 21:00 h	7:30 - 21:00 h
Fin de semana, días festivos	16:00 - 19:00 h	11:00 - 16:00 h 16:00 - 21:00 h	11:00 -21:00 h

El perfil de abertura recién detallado se aplicará a la abertura de ventanas propuestas como variables de uso dentro de la matriz de evaluación aplicada al caso de estudio.

6.2.6 Ganancias internas

Los valores de los aportes energéticos generados al interior de la vivienda, se ingresaron en el simulador central “Apache”, para cada una de las habitaciones que conforman el modelo. Para efecto de ocupación, los datos respondieron al perfil de uso proyectado y fueron incorporados en W/persona, tanto para ganancia máxima latente, como ganancia sensible (tabla 6.6). En relación al aporte por iluminación, estos valores fueron adquiridos a partir de los antecedentes del proyecto eléctrico de la vivienda y fueron ingresados como w/m² (tabla 6.7). Finalmente, los equipos y artefactos domésticos, se ajustaron al perfil de uso de los ocupantes, siendo ingresados en watt (tabla 6.8).

Tabla 6.6: Cuadro de aportes energéticos por efecto de ocupación.

Recinto	Area m2	Nº Ocupantes	Densidad Ocupacional	Tipo de Actividad	Aporte W/p	Aporte Total CS W/m2	Aporte Total CL W/m2	Horario Ocupación Lunes - viernes	Horario Ocupación Sabado - domingo
Living comedor	17,9	2	0,11	Actividad Media	140	9,4	6,3	19:00 a 21:00 h	10:00 a 16:00 h 19:00 a 22:00 h
Cocina estar	14,7	3	0,20	Actividad Media	140	17,2	11,5	19:00 a 21:00 h	10:00 a 16:00h 19:00 a 22:00 h
Hall acceso	6,95	...	...	...	...	...	...	...	...
Hall dist. 2 nivel	6,95	...	...	...	...	...	...	...	...
Dormitorio 1	8,23	2	0,24	Recostado/dorm.	115	16,8	11,2	21:00 a 07:00 h	22:00 a 09:00 h
Baño 1	3,46	...	...	...	...	...	...	...	...
Dormitorio 2	9,24	1	0,11	Recostado/dorm.	115	7,5	5,0	21:00 a 07:00 h	22:00 a 10:00 h
Dormitorio 3	7,03	1	0,14	Recostado/dorm.	115	9,8	6,5	21:00 a 07:00 h	22:00 a 10:00 h
Baño 2	3,51	...	...	...	...	...	...	...	...
Ático	45,65	1	0,02	Recostado/dorm.	115	1,5	1,0	21:00 a 07:00 h	22:00 a 10:00 h
Area escalera	3,4	...	...	...	...	...	...	...	...

Tabla 6.7: Cuadro de aportes energéticos por efecto de iluminación.

Recinto	Nº luminarias	Aporte por luminaria (w)	Aporte por Iluminación (W/m2)	Horario encendido luces Lunes - Domingo
Living comedor	3	15	2,5	21:00 a 23:00 h
Cocina estar	2	20	2,7	21:00 a 23:00 h
Hall acceso	1	15	2,2	21:00 a 23:00 h
Hall distribución 2 nivel	1	15	2,2	21:00 a 23:00 h
Dormitorio 1	3	15	5,5	21:00 a 23:00 h
Baño 1	2	15	8,7	21:00 a 22:00 h
Dormitorio 2	2	15	3,2	21:00 a 23:00 h
Dormitorio 3	2	15	4,3	21:00 a 23:00 h
Baño 2	1	15	4,3	21:00 a 22:00 h
Ático	3	15	1,0	21:00 a 23:00 h
Area escalera	1	15	4,4	21:00 a 23:00 h

Tabla 6.8: Cuadro de aportes energéticos por efecto de Artefactos y equipos de uso doméstico.

Recintos	Equipos	W / equipo	Nº Equipos	Aporte Equipos (W/m2)	Horario encendido Equipo	Días encendido
Living comedor	Televisor	150	1	3,4	19:00 a 21:00 h	L-D
Cocina estar	Refrigerador	310	1	8,5	Encendido 24/7	L-D
	Cocina	1000	1	12,7	12:00 a 13:30 h	S-D
Hall acceso	...	...	...	...	...	...
Hall distribución 2 nivel	...	...	...	...	...	...
Dormitorio 1	Televisor	150	1	7,3	21:00 a 23:00 h	L-D
Baño 1	...	...	...	...	...	...
Dormitorio 2	Computador	55	1	1,3	21:00 a 23:00 h	L-D
Dormitorio 3	Computador	55	1	1,7	21:00 a 23:00 h	L-D
Baño 2	...	...	...	...	...	...
Ático	Televisor	150	1	1,3	21:00 a 23:00 h	L-D
	Computador	55	1	0,3	21:00 a 23:00 h	L-D
Area escalera	...	...	...	...	...	...
Ático - estar	Televisor	150	1	2,4	21:00 a 23:00 h	L-D
	Computador	55	1	0,5	21:00 a 23:00 h	L-D
Ático - dormitorio	Televisor	150	1	3,5	21:00 a 23:00 h	L-D
	Computador	55	1	0,7	21:00 a 23:00 h	L-D

La totalidad de los datos fueron adquiridos mediante especificaciones o tablas acordes al uso y la realidad local, contemplando lo levantado por Bustamante y Rozas (2009), así como valores por tablas incluidos en el manual de fundamentos de ASHRAE (2017) y de la guía A de CIBSE (2015). Además, se debieron incluir valores de los aportes de equipos electrónicos a partir de las especificaciones técnicas de sus fabricantes.

6.2.7 Especificaciones Windcatcher

De acuerdo al dispositivo de ventilación natural seleccionado en el capítulo 3 se consideró la opción “Windcatcher™”, desarrollada por Monodraught. Dicho dispositivo cuenta con todos sus componentes pre-modelados por el fabricante, para ser integrados en el modelo base de la vivienda, el cual es cargado a la biblioteca de componentes del ModelIT, para su posterior evaluación en los distintos simuladores que cuenta el software IES. (figura 6.2)

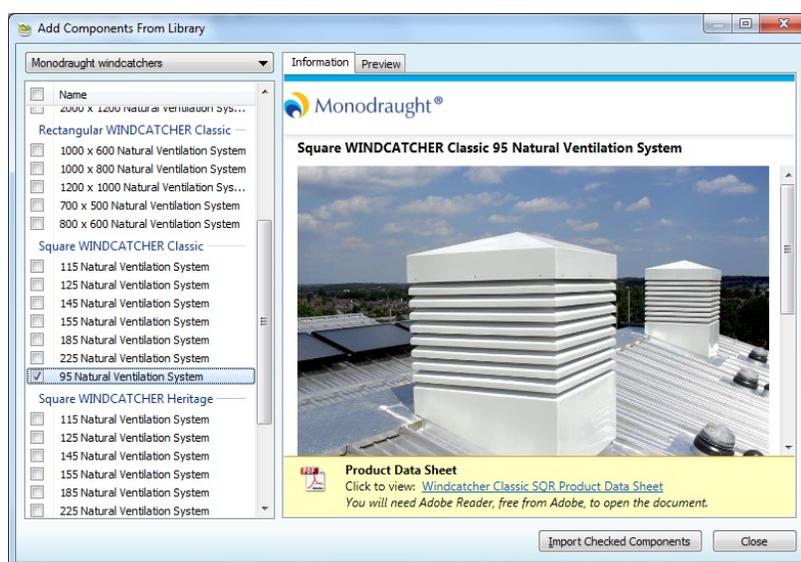


Figura 6.2: Catalogo de componentes de ventilación pre-modelados por Monodraught, para ser agregados al modelo de vivienda desarrollado en el ModelIT del software IES.

El modelo considerado para la evaluación es el Windcatcher™, Square – Classic 95, detallado en el punto 4.6 del capítulo 4, que para efecto de la simulación, IESVE lo asume como una réplica simplificada del sistema real, reconociendo: la volumetría externa del captador; las rejillas (Louvres); el tronco que contiene al ducto; el amortiguador (damper) y la rejilla o celosía de terminación de cielo. Por consiguiente, el software para efectos de cálculo, divide en ocho zonas el windcatcher: cuatro zonas para los cuadrantes interiores en el área de captación bajo las rejillas o louvres y cuatro zonas para el ducto interior que remata en el damper (figura 6.3). Las zonas antes mencionadas poseen en sus extremos condiciones de abertura que fueron configuradas en la aplicación de IES “MacroFlo”, según lo especificado por IES Virtual Environment (2015 d) y IES Virtual Environment (2015 b).

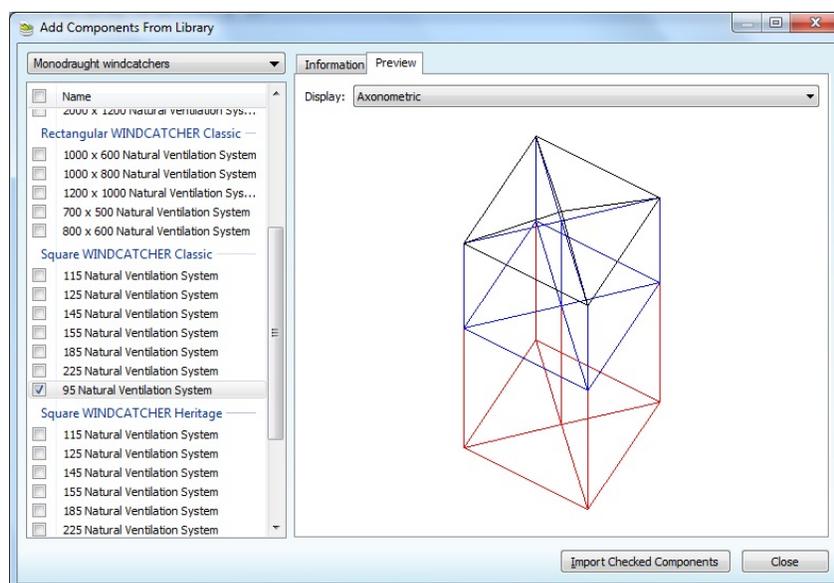


Figura 6.3: Axonométrica de las ocho zonas que conforman el modelo simplificado del windcatcher.

En las cuatro zonas asociadas a los cuadrantes de captación, particularmente en el área de louvres, se debe asignar un tipo de exposición, debido a que esta abertura queda expuesta al flujo de aire externo. Para el caso de este parámetro, el tipo de exposición asignado fue el de “expuesto”, lo cual se incorporó tras las observaciones de los flujos de aire para la zona sobre la cumbrera, en la evaluación de los flujos externos, desarrollado en el capítulo 5. Finalmente, en lo que respecta a los patrones de abertura, para el caso de esta evaluación se dejaron abiertos las 24 horas, con el fin de evaluar el comportamiento tanto diurno como nocturno del dispositivo en los meses de verano.

6.3 Evaluación de la incidencia de la orientación de la vivienda en el desempeño de la ventilación natural

La tipología de vivienda analizada cuenta con la mayoría de sus aberturas (ventanas) en la fachada frontal y posterior, a diferencia de las fachadas laterales que se presentan prácticamente herméticas. Esto tiene su origen en el sistema de agrupamiento, que prioriza mayores distancias para el fondo del sitio y mantienen los distanciamientos mínimos entre las propiedades laterales (4.3.2 condiciones del modelo de conjunto). Todo lo anterior genera que las viviendas posean opciones de ventilación cruzada en el sentido longitudinal, que es el que cuenta con aberturas en ambas caras. Dicha condición presentará diferencias en el potencial de ventilación, dependiendo de la orientación que tome la vivienda respecto a los vientos predominantes en las estaciones cálidas, ya que si la vivienda enfrenta a los flujos de viento con su cara hermética, no tendrá las mismas condiciones que aquella que lo haga con sus aberturas.

Para determinar el impacto de la orientación de la vivienda respecto a los vientos predominantes, se tomaron en consideración los valores de los flujos ingresados a través de las ventanas del ático. Para ello se contrastaron dos alternativas de orientación: la vivienda a la cual el viento incide de manera frontal y la vivienda a la que el viento impacta de manera lateral. Finalmente, se evaluó el comportamiento del flujo de aire ingresado a través del Windcatcher, para las mismas dos orientaciones de vivienda antes mencionadas.

6.3.1 Evaluación del desempeño de la ventilación a través de las ventanas respecto a la orientación de la vivienda

La primera evaluación se centró en la variable (A1c) establecida en la matriz de evaluación interna (punto 3.6.3). La cual considera a la vivienda orientada para recibir el flujo de aire exterior de manera frontal a la fachada principal, que es la que cuenta con ventanas a través de las cuales el flujo de aire atraviesa la vivienda en el mismo sentido del viento. (figura 6.4).

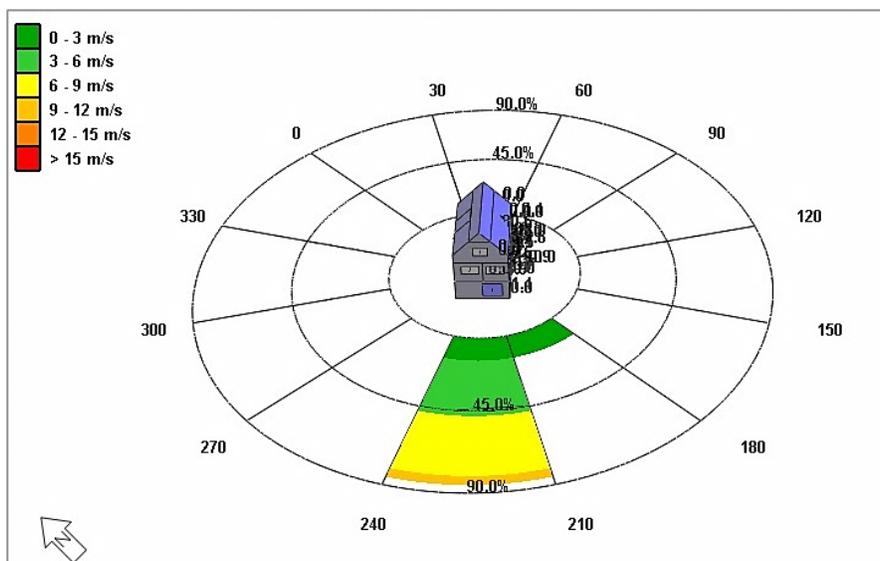


Figura 6.4: Orientación de la vivienda con la fachada frontal en dirección sur poniente, desde donde provienen los vientos frescos en las estaciones cálidas para la ciudad de Concepción.

En lo que refiere a la evaluación de los flujos de aire al interior del ático, se determinó como hora de análisis las 16:00 h del día 17 de enero, en la cual se registró una velocidad de viento de 8,7 m/s y una dirección de viento en 230 deg, arrojando para la variable (A1c) un flujo de aire neto de 1508,5 l/s, ingresado por la ventana que enfrenta al viento (figura 6.5), lo cual transformado a renovaciones/hora implica 57, 1 (1/h), considerando los 95,1 m³ de volumen del ático completo.

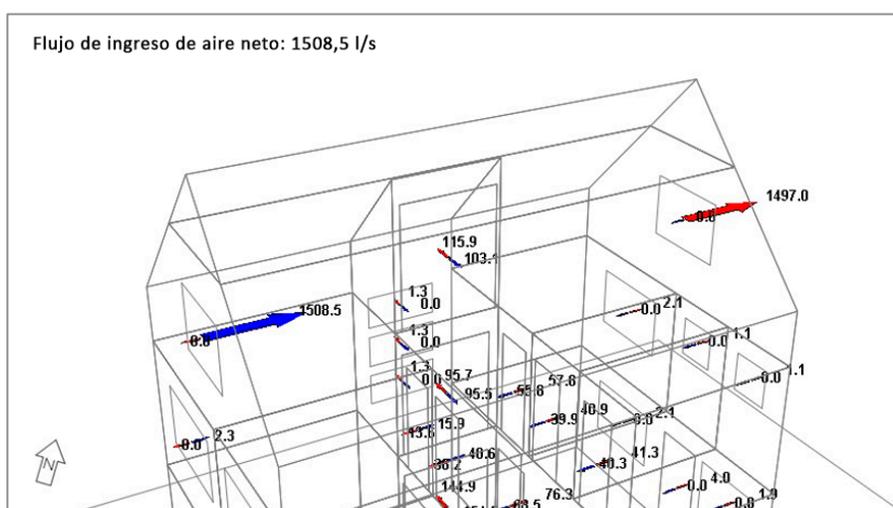


Figura 6.5: Visualización de las flechas y valores de los flujos de aire obtenidos para la variable A1c, mediante el cálculo de MacroFlo.

Para el caso de la variable (B1c), en que la vivienda es orientada con el viento predominante impactando en las fachadas sin ventanas (fig. 6.6). Los resultados de los flujos ingresados por las ventanas del ático correspondieron a un flujo de aire neto de 372 l/s (figura 6.7), lo cual traducido a renovaciones/hora implica 14,08 (1/h), considerando los 95,1 m³ de volumen total del ático. Cabe señalar, que el flujo de aire llega de manera tangencial a ambas ventanas, cuando el viento golpea de forma perpendicular a la fachada lateral, es decir con un ángulo de 225 deg. Sin embargo, a la hora de análisis, el viento estaba a un ángulo de 230 deg, direccionando levemente el impacto del viento a la fachada norponiente, lo cual generó que el ingreso del flujo de aire se diera por la ventana de esa fachada.

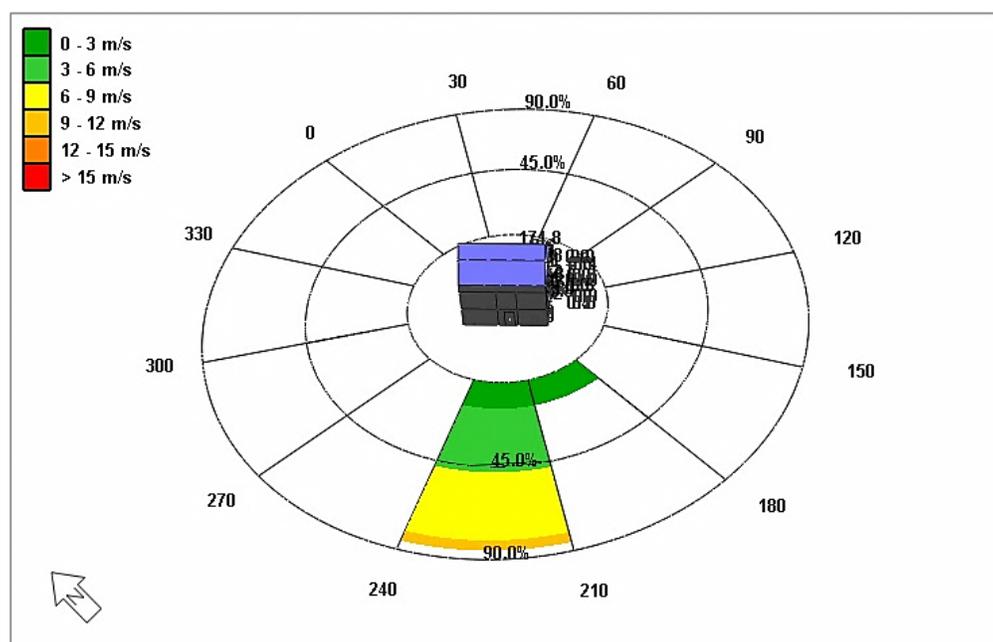
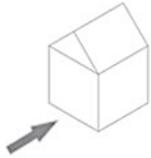
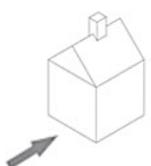
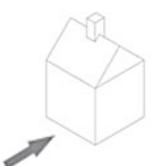


Figura 6.6: Orientación de la vivienda con la fachada lateral en dirección sur poniente, desde donde provienen los vientos frescos en las estaciones cálidas para la ciudad de Concepción.

sino que también a los cambios de dirección que pueda experimentar el viento. Todo lo anterior contrasta con el desempeño de la ventilación a través de las ventanas, donde el cambio de orientación si afectó significativamente los flujos de aire ingresados (tabla 6.9).

Tabla 6.9: Cuadro resumen resultados de impacto en el desempeño de la ventilación natural, tras el cambio de orientación de la vivienda. En la parte superior las variables A1c y B1c, con los flujos de aire ingresados por ventanas, mientras que en la parte inferior las variables AWC1a y BWC1a, con los flujos de aire ingresados a través del Windcatcher.

<p>A1c</p>  <p>1508,5 l/s</p>	<p>B1c</p>  <p>372 l/s</p>
<p>AWC1a</p>  <p>218,3 l/s</p>	<p>BWC1a</p>  <p>218,6 l/s</p>

6.4 Evaluación de las temperaturas interiores a partir de la incorporación del windcatcher

6.4.1 Proceso de evaluación de las temperaturas interiores

Para determinar el impacto de la ventilación natural en las temperaturas interiores del ático, se realizó una evaluación que vincula las tasas de ventilación con las condiciones térmicas resultantes para el ambiente interior. Luego, a partir de las temperaturas operativas arrojadas por la simulación, se efectuó un análisis de confort térmico con el fin de establecer parámetros de aceptación por parte de los ocupantes. Finalmente se hizo un análisis comparativo entre las temperaturas alcanzadas por el caso base de estudio y las conseguidas por el caso con el Windcatcher incorporado, visualizando de esta forma, el impacto de este último, frente a variables de diseño y uso del ático, así como su orientación respecto a los vientos predominantes en verano, ver matriz de evaluación interior establecida en el punto 3.6.3. Cabe señalar que las variables de uso, particularmente lo relacionado con la abertura de

ventanas, estará de acuerdo al horario fijado en el perfil de abertura de estas en el punto 6.2.5. Mientras que en el caso del Windcatcher, esté permanecerá abierto en la totalidad de las horas, con objeto de visualizar su aporte en las temperaturas nocturnas.

De esta manera las simulaciones predijeron las temperaturas operativas, las cuales “Apache” calcula como promedio ponderado de la temperatura media del aire interior y la temperatura radiante media de la superficie, acorde con los métodos de ASHRAE 55 - 2017 considerados como criterios generales de cálculo y cargas a lo largo de la evaluación. Posteriormente, los resultados fueron entregados por el visor del simulador “Vista Pro”, generando un registro de las temperaturas operativas para al día de análisis determinado cada una hora. Por último, se analizaron las temperaturas obtenidas en relación a la banda de confort, de acuerdo al modelo adaptativo seleccionado para este estudio en el punto 3.4 del capítulo 3, determinando de esta manera que disposición del ático cumple con el estándar de confort. (ver planillas de resultados en Anexo C)

6.4.2 Análisis de confort térmico a partir de las temperaturas operativas resultantes

Con el fin de analizar las temperaturas operativas obtenidas tras el proceso de simulación, se realizó para cada una de las variables de la matriz de evaluación interna (3.6.3) una síntesis gráfica que cuenta con: el código de la variable de análisis; el ícono en planta de la variable; el gráfico que contiene la banda de confort y el comportamiento de las temperaturas operativas por recinto, para el escenario climático de análisis (día 17 de enero) (figura 6.10).

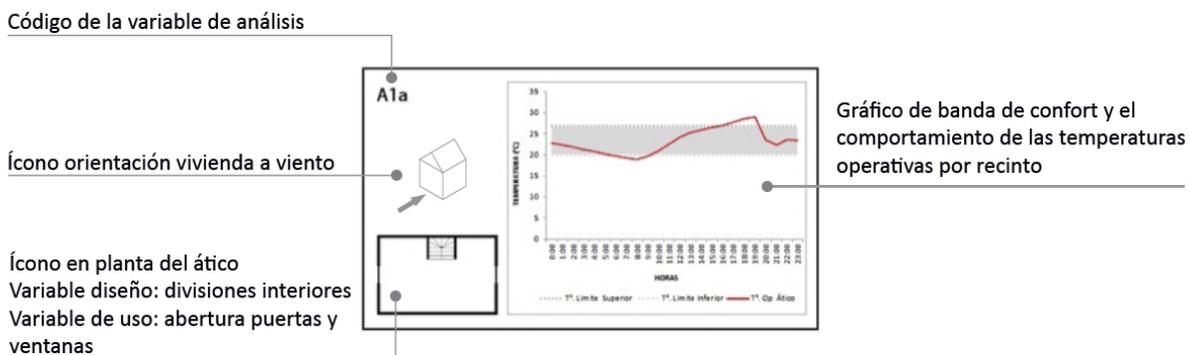


Figura 6.10: Síntesis gráfica del comportamiento de las temperaturas operativas respecto a la banda de confort, por variable.

Luego se contrastaron cuatro variables del ático de manera tal que se pudiera comparar, por ejemplo, la variable A1a con AWC1a, ambas de igual configuración, excepto por la incorporación del Windcatcher en la segunda. Lo mismo ocurre con B1a y BWC1a, donde la diferencia con las anteriores radica en la orientación de la vivienda respecto a los vientos predominantes. Finalmente, a través de un cuadro se contrastaron las temperaturas máximas obtenidas en cada recinto con la temperatura que marca el límite superior de la banda de confort, en este caso 26,9 °C. Esto se aplicó para las cuatro variables, marcando en rojo la temperatura del recinto que superaba el límite superior de la banda (figura 6.11).

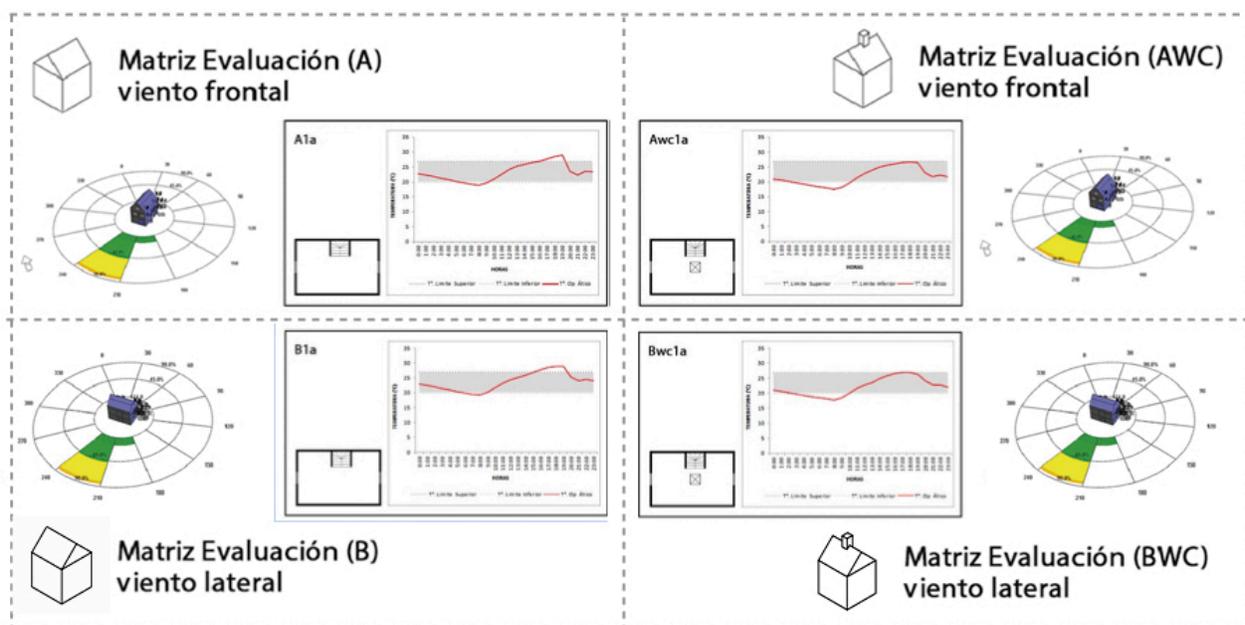


Figura 6.11: Esquema funcionamiento de la matriz comparativa de resultados de las temperaturas operativas respecto a la banda de confort.

I) Análisis de confort térmico, variables A1a, AWC1a, B1a, BWC1a

La figura 6.12 presenta los resultados de temperaturas operativas por recintos para las variables A1a, AWC1a, B1a, BWC1a, respecto al rango de temperaturas de confort térmico establecido para el día de análisis. En cuanto a las cuatro variantes, estas tienen como base al ático conformado por un recinto único con sus dos ventanas cerradas. Las variaciones responden a que en “A1a” la vivienda enfrenta con

su fachada frontal el viento predominante (sur poniente), de la misma manera lo hace “AWC1a”, sin embargo, ésta última tiene incorporado un Windcatcher. Por otra parte, “B1a” es la vivienda con el viento predominante incidiendo en su fachada lateral, al igual que “BWC1a”, con la diferencia que ésta última cuenta con un Windcatcher.

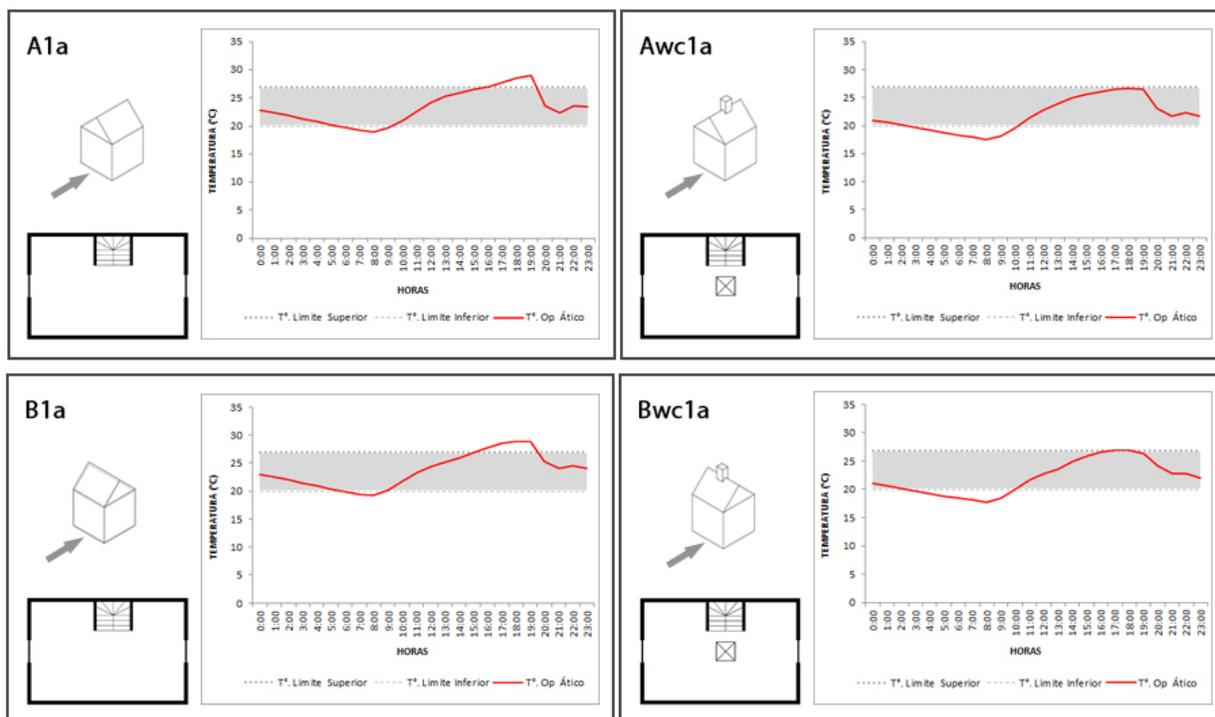


Figura 6.12: Gráficos de temperaturas operativas (°C) por recinto, en relación al rango de confort térmico establecido, para las variables A1a, AWC1a en la parte superior y B1a, BWC1a en la parte inferior. Día de análisis (17 de enero).

Tabla 6.10: Valores de temperatura operativa máxima (°C) de cada recinto, en relación a la temperatura límite del rango de confort térmico (°C). Para las variables de análisis A1a, AWC1a, B1a, BWC1a.

	A1a	AWC1a	B1a	BWC1a
Recinto	Ático	Ático	Ático	Ático
Temp op. Max.	28,95	26,48	28,85	26,34
Temp. lim. sup.	26,9	26,9	26,9	26,9

En la variable “A1a” (figura 6.12) las temperaturas operativas resultantes para el interior del ático, sobrepasaron el límite superior del rango de confort durante cuatro horas, alcanzando una máxima de 28,95 °C a las 19:00 h. En cambio, al incorporar el Windcatcher “AWC1a” las temperaturas operativas no sobrepasaron el límite superior, registrando a las 19:00 h una temperatura de 26,48 °C (tabla 6.10) lo cual representa 2,47 K menos que la vivienda sin el Windcatcher incorporado.

Respecto a la evaluación de “B1a” (figura 6.12), esta alcanzó una temperatura operativa máxima de 28,85 °C a las 19:00 h, mientras que el límite superior del rango de confort fue superado durante cuatro horas. Con la incorporación del Windcatcher “BWC1a”, las temperaturas operativas quedaron por debajo del límite superior del rango de confort, registrando para las 19:00 h una temperatura de 26,34 °C (tabla 6.10) lo que representa 2,51 K menos que en la vivienda sin Windcatcher.

Finalmente podemos establecer que tanto para el caso “A1a” como “B1a”, la incorporación del Windcatcher “AWC1a” y “BWC1a” respectivamente, representó la disminución de las temperaturas operativas máximas, dejándolas dentro del rango de confort establecido para el día escenario de análisis. Además, para ambos casos, la incorporación del Windcatcher, permitió rebajar de 4 a 0 horas, las temperaturas operativas sobre el límite superior del rango de confort antes mencionado. Cabe señalar que estos casos representan la condición para el ático donde el Windcatcher obtiene la mayor cobertura, dado que, al permanecer las ventanas cerradas, este se transforma en la única fuente de ingreso de aire desde el exterior.

II) Análisis de confort térmico, variables A1b, AWC1b, B1b, BWC1b

La figura 6.13 presenta los resultados temperaturas operativas por recintos, para las variables A1b, AWC1b, B1b, BWC1b, respecto al rango de temperaturas de confort térmico establecido para el día de análisis. En cuanto a las cuatro variantes, estas tienen como base al ático conformado por un recinto único, con la ventana frontal abierta y la posterior cerrada. Las variaciones responden a que en “A1b” la vivienda enfrenta con su fachada frontal el viento predominante (sur poniente), de la misma manera lo hace “AWC1b”, sin embargo, ésta última tiene incorporado un Windcatcher. Por otra parte, “B1b” es la vivienda con el viento predominante incidiendo en su fachada lateral, al igual que “BWC1b”, con la diferencia que ésta última cuenta con un Windcatcher

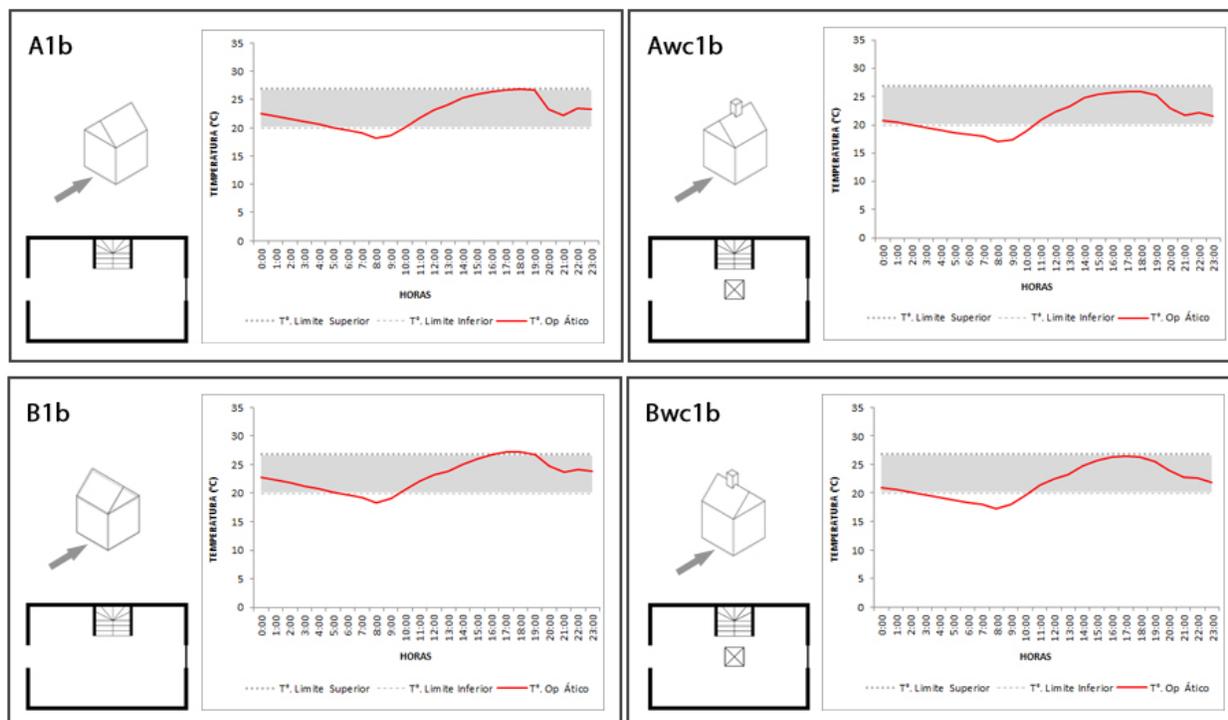


Figura 6.13: Gráficos de temperaturas operativas (°C) por recinto, en referencia al rango de confort térmico establecido, para las variables A1b, AWC1b en la parte superior y B1b, BWC1b en la parte inferior. Día de análisis (17 de enero).

Tabla 6.11: Valores de temperatura operativa máxima (°C) de cada recinto, respecto a la temperatura límite del rango de confort térmico (°C). Para las variables de análisis A1b, AWC1b, B1b, BWC1b.

	A1b	AWC1b	B1b	BWC1b
Recinto	Ático	Ático	Ático	Ático
Temp op. Max.	26,9	25,91	27,18	26,29
Temp. lim. sup.	26,9	26,9	26,9	26,9

En la variable “A1b”, (figura 6.13) las temperaturas operativas obtenidas al interior del ático, sobrepasaron durante una hora el límite superior del rango de confort establecido, alcanzando una máxima de 26,9 °C a las 18:00 h. En cambio, al incorporar Windcatcher “AWC1b” las temperaturas operativas no sobrepasaron el límite superior, registrando una temperatura de 25,91 °C para las 19:00 h (tabla 6.11), lo cual representa 1 K menos que sin el Windcatcher incorporado.

Por otro lado, la variable “B1b” (figura 6.13), alcanzó una temperatura operativa máxima de 27,18 °C a las 18:00 h, mientras que el límite superior del rango de confort fue superado durante dos horas. Con la incorporación del Windcatcher “BWC1b” no se registraron temperaturas operativas sobre el límite superior del rango de confort. Obteniendo una temperatura de 26,29 °C para las 18:00 h (tabla 6.11) lo cual implica 0,89 K menos que la vivienda sin el Windcatcher incorporado.

En lo que refiere a las variables “A1b” y “B1b”, tras la incorporación del Windcatcher “AWC1b” y “BWC1b” se logró para ambos, la disminución de las temperaturas operativas máximas, inscribiéndolas en el rango de confort. Por otra parte, se destaca el hecho, de que a pesar que la ventana de la fachada frontal estuviera abierta, esto no impidió para “A1b” y “B1b”, que a las 18:00 h la temperatura interior superara el límite de confort establecido. También, se evidencia el efectivo funcionamiento del Windcatcher en conjunto con la ventana abierta que se encuentra a barlovento.

III) Análisis de confort térmico, variables A1c, AWC1c, B1c, BWC1c

La figura 6.14 presenta los resultados de temperaturas operativas por recintos, para las variables A1c, AWC1c, B1c, BWC1c, respecto al rango de temperaturas de confort térmico establecido para el día de análisis. En cuanto a las cuatro variantes, estas tienen como base al ático conformado por un recinto único con sus dos ventanas abiertas. Las variaciones responden a que en “A1c” la vivienda enfrenta con su fachada frontal el viento predominante (sur poniente), de la misma manera lo hace “AWC1c”, sin embargo, ésta última tiene incorporado un Windcatcher. Por otra parte, “B1c” es la vivienda con el viento predominante incidiendo en su fachada lateral, al igual que “BWC1c”, con la diferencia que ésta última cuenta con un Windcatcher.

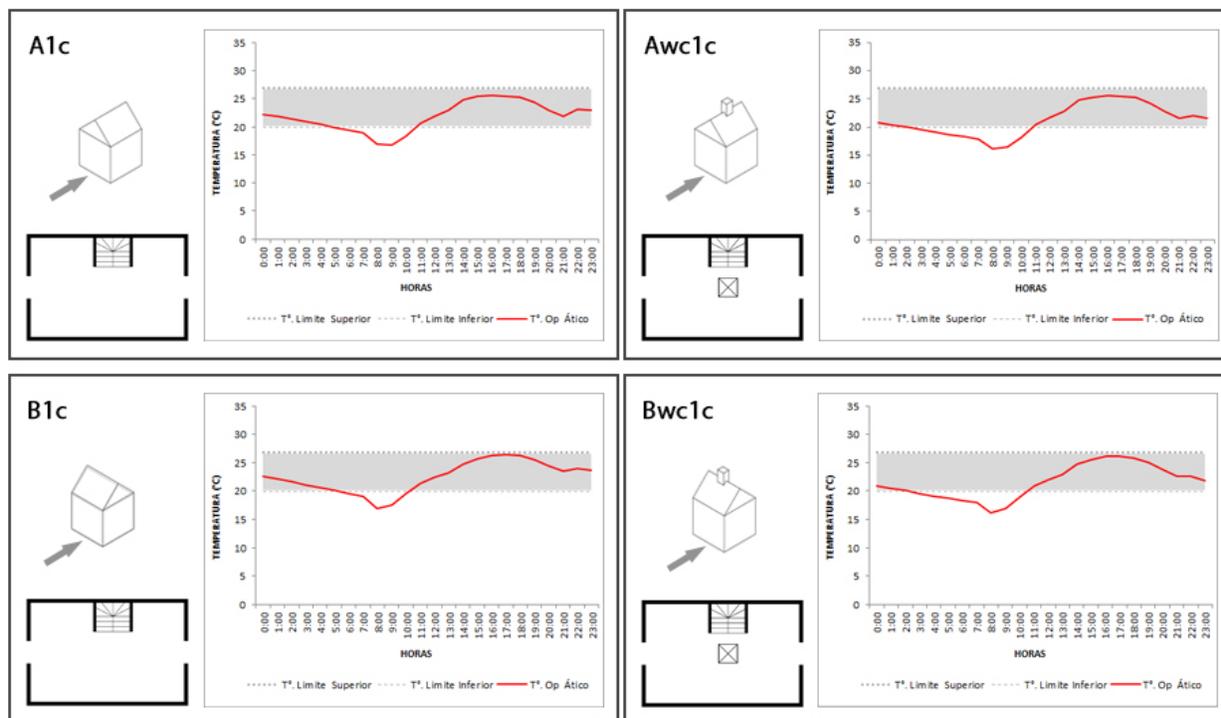


Figura 6.14: Gráficos de temperaturas operativas (°C) por recinto, en referencia al rango de confort térmico establecido, para las variables A1c, AWC1c en la parte superior y B1c, BWC1c en la parte inferior. Día de análisis (17 de enero).

Tabla 6.12: Valores de temperatura operativa máxima (°C) de cada recinto, respecto la temperatura límite del rango de confort térmico (°C). Para las variables de análisis A1c, AWC1c, B1c, BWC1c.

	A1c	AWC1c	B1c	BWC1c
Recinto	Ático	Ático	Ático	Ático
Temp op. Max.	25,59	25,52	26,49	26,12
Temp. lim. sup.	26,9	26,9	26,9	26,9

En la variable “A1c” (figura 6.14) las temperaturas operativas no sobrepasaron el límite superior del rango de confort establecido, alcanzando una temperatura máxima de 25,59 °C a las 16:00 h. Tras incorporar el Windcatcher “AWC1c” las temperaturas operativas se mantuvieron en el rango de confort, registrando para las 16:00 h una temperatura de 25,52 °C (tabla 6.12), lo que representa 0,07 K menos que la vivienda sin el Windcatcher incorporado.

Respecto a la variable “B1c” (figura 6.14), esta alcanzó una temperatura operativa máxima de 26,49 °C a las 17:00 h, sin registrar temperaturas sobre el límite superior del rango de confort. Con la incorporación del Windcatcher “BWC1c” tampoco se registraron temperaturas operativas sobre el límite superior del rango de confort. Obteniendo una temperatura de 26,12 °C para las 17:00 h (tabla 6.12), lo cual implica un 0,37 K menos que sin el Windcatcher incorporado.

En las variables analizadas en este punto, se puede evidenciar el bajo aporte del Windcatcher ante la condición de las dos ventanas abiertas para el ático en análisis. Principalmente para el caso “A1c” que presenta la condición de ventilación cruzada en el sentido de los vientos predominantes.

IV) Análisis de confort térmico, variables A2a, AWC2a, B2a, BWC2a

La figura 6.15 presenta los resultados temperaturas operativas por recintos, para las variables A2a, AWC2a, B2a, BWC2a, respecto al rango de temperaturas de confort térmico establecido para el día de análisis. En cuanto a las cuatro variantes, estas tienen como base al ático dividido en un dormitorio y un estar, con sus dos ventanas y puerta cerrada. Las variaciones responden a que en “A2a” la vivienda enfrenta con su fachada frontal el viento predominante (sur poniente), de la misma manera lo hace “AWC2a”, sin embargo, ésta última tiene incorporado un Windcatcher. Por otra parte, “B2a” es la vivienda con el viento predominante incidiendo en su fachada lateral, al igual que “BWC2a”, con la diferencia que ésta última cuenta con un Windcatcher.

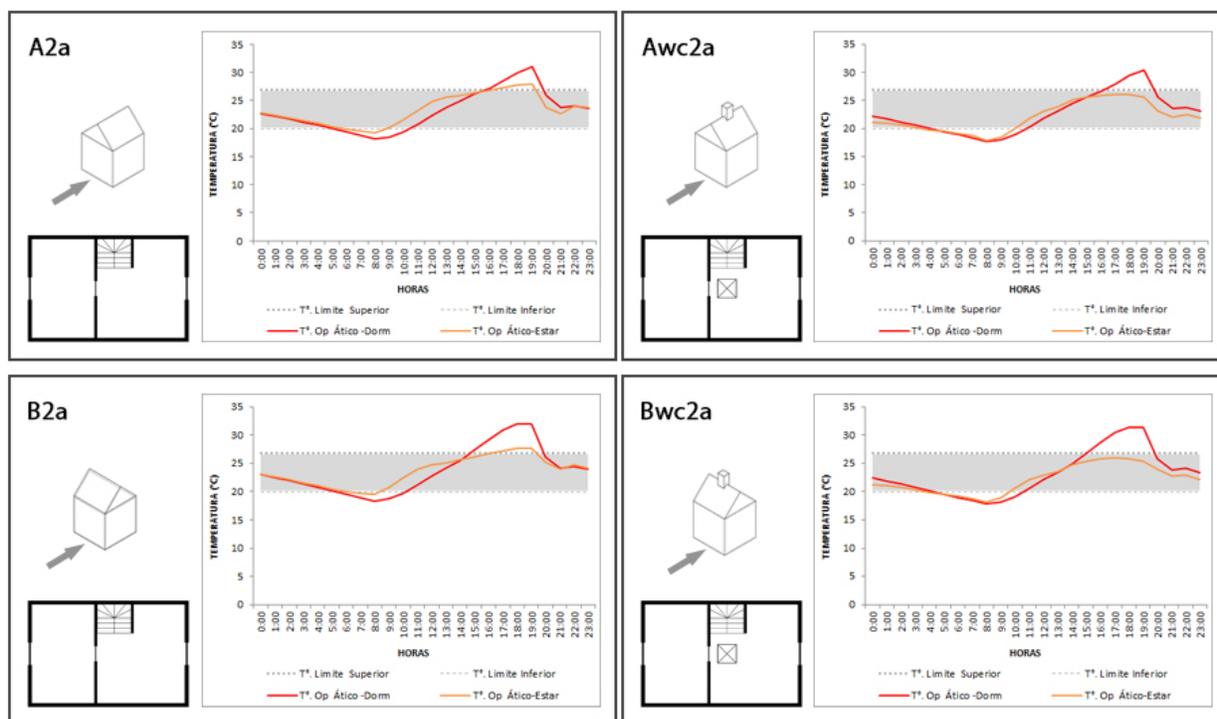


Figura 6.15: Gráficos de temperaturas operativas (°C) por recinto, en referencia al rango de confort térmico establecido, para las variables A2a, AWC2a en la parte superior y B2a, BWC2a en la parte inferior. Día de análisis (17 de enero).

Tabla 6.13: Valores de temperatura operativa máxima (°C) de cada recinto, respecto a la temperatura límite del rango de confort térmico (°C). Para las variables de análisis A2a, AWC2a, B2a, BWC2a

Recinto	A2a		AWC2a		B2a		BWC2a	
	Dorm.	Estar	Dorm.	Estar	Dorm.	Estar	Dorm.	Estar
Temp op. Max.	30,95	27,95	30,38	25,61	31,98	27,71	31,39	25,44
Temp. lim. sup.	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9

En la evaluación de la variable “A2a” (figura 6.15), las temperaturas operativas para el primero sobrepasaron durante cuatro horas el límite superior del rango de confort establecido, alcanzando una máxima de 30,95 °C a las 19:00 h. Mientras que el estar sobrepasó durante tres horas el límite de confort, con una temperatura de 27,95 °C. En cambio, al incorporar el Windcatcher “AWC2a”, las temperaturas operativas para el “dormitorio”, superaron el límite superior durante tres horas,

registrando para las 19:00 h una temperatura de 30,38 °C (tabla 6.13), lo que representa 0,57 K menos que A2a. Por su parte el “estar” no registró temperaturas sobre el límite, presentando para las 19:00 h una temperatura de 25,61 °C (tabla 6.13), lo cual implica 2,34 K menos que el estar del caso “A2a”.

Respecto a la evaluación de “B2a” (figura 6.15), ésta alcanzó para el dormitorio una temperatura operativa máxima de 31,98 °C a las 19:00 h, mientras que el límite superior del rango de confort fue superado en cinco horas. Por su parte el estar sobrepasó durante tres horas el límite de confort, con una temperatura de 27,71 °C. Después de la incorporación del Windcatcher “BWC2a”, las temperaturas operativas para el “dormitorio”, superaron el límite superior durante cuatro horas, registrando para las 19:00 h una temperatura de 31,39 °C (tabla 6.13), lo que representa 0,59 K menos que el caso “B2a”. Mientras que el estar no registró temperaturas sobre el límite de confort, presentando una temperatura de 25,44 °C a las 19:00 h (tabla 6.13), lo cual representó 2,27 K menos que el estar del caso “B2a”.

Tanto en la evaluación “A2a” como “B2a”, se puede apreciar el impacto de mantener la puerta cerrada entre el dormitorio y el estar, ya que al incorporar el Windcatcher a ambos casos, este logró mantener las temperaturas del estar dentro del rango de confort, a diferencia del dormitorio que mantiene sus temperaturas por sobre el límite superior del rango de confort (figura 6.15).

V) Análisis de confort térmico, variables A2b, AWC2b, B2b, BWC2b

La figura 6.16 presenta los resultados temperaturas operativa por recintos, para las variables A2b, AWC2b, B2b, BWC2b, respecto al rango de temperaturas de confort térmico establecido para el día de análisis. En cuanto a las cuatro variantes, estas tienen como base el ático dividido en un dormitorio y un estar, donde ambas ventanas se encuentran cerradas con la puerta interior abierta. Las variaciones responden a que en “A2b” la vivienda enfrenta con su fachada frontal el viento predominante (sur poniente), de la misma manera lo hace “AWC2b”, sin embargo, ésta última tiene incorporado un Windcatcher. Por otra parte, “B2b” es la vivienda con el viento predominante incidiendo en su fachada lateral, al igual que “BWC2b”, con la diferencia que ésta última cuenta con un Windcatcher.

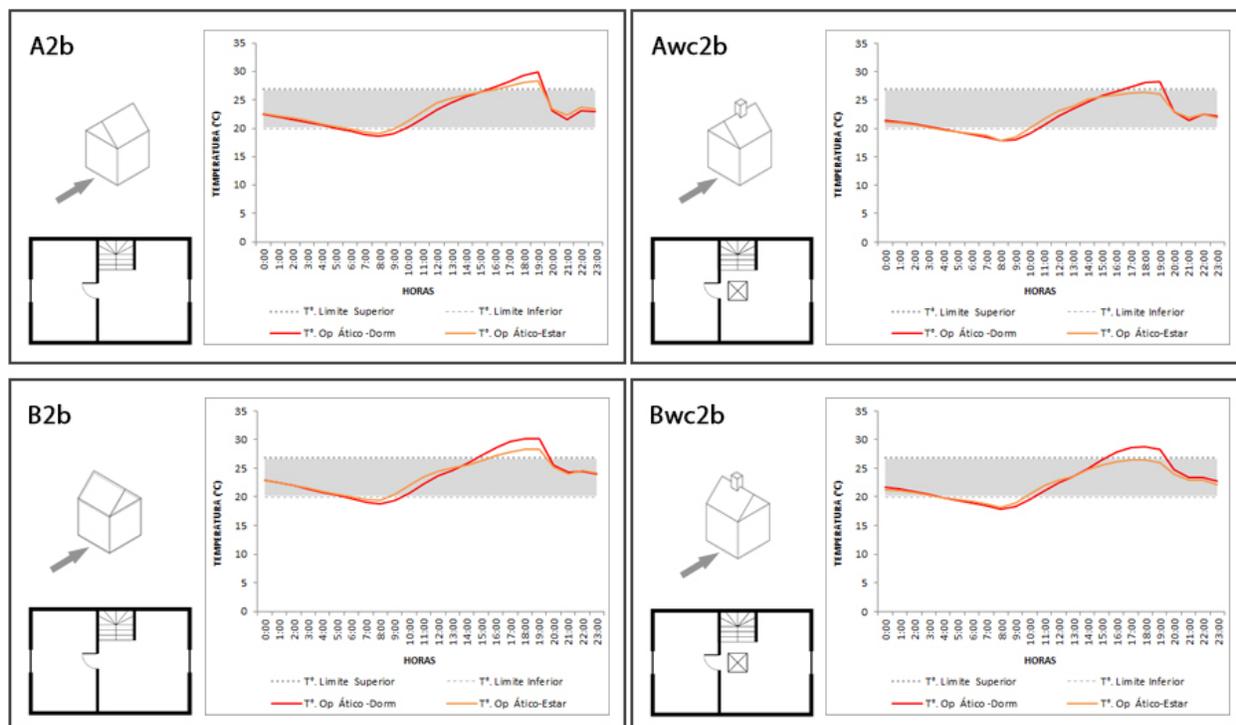


Figura 6.16: Gráficos de las temperaturas operativas (°C) por recinto, en referencia al rango de confort térmico establecido, para las variables A2b, AWC2b, en la parte superior y B2b, BWC2b en la parte inferior. Día de análisis (17 de enero).

Tabla 6.14: Valores de la temperatura operativa máxima (°C) de cada recinto, respecto la temperatura límite del rango de confort térmico (°C). Para las variables de análisis A2b, AWC2b, B2b, BWC2b.

	A2b		AWC2b		B2b		BWC2b	
Recinto	Dorm.	Estar	Dorm.	Estar	Dorm.	Estar	Dorm.	Estar
Temp op. Max.	29,93	28,4	28,19	26,04	30,19	28,22	28,78	26,41
Temp. lim. sup.	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9

En cuanto a la evaluación de la variable “A2b” (figura 6.16), las temperaturas operativas del “dormitorio” sobrepasaron durante cuatro horas el límite superior del rango de confort establecido, alcanzando una temperatura máxima de 29,93°C a las 19:00 h. Asimismo el “estar” sobrepasó durante tres horas el límite de confort, registrando una temperatura de 28,4°C. Al incorporar el Windcatcher “AWC2b” las

temperaturas operativas para el “dormitorio” sobrepasaron el límite superior durante tres horas, con una temperatura registrada a las 19:00 h de 28,19°C (tabla 6.14), lo cual representa 1,74 K menos que el caso A2b. Por su parte el “estar” no registró temperaturas sobre el límite superior de confort, presentando una temperatura de 26,04 °C a las 19:00 h (tabla 6.14), lo que implica 2,36 K menos que el estar del caso “A2b”.

En la variable “B2b” (figura 6.16), el dormitorio alcanzó una temperatura operativa máxima de 30,19 °C a las 18:00 h, en lo que refiere al límite superior del rango de confort este fue superado durante cinco horas. El estar por su parte, sobrepasó durante cuatro horas el límite de confort, con una temperatura de 28,22 °C. Con la incorporación del Windcatcher “BWC2b” las temperaturas operativas para el dormitorio, superaron el límite superior durante cuatro horas, registrando a las 18:00 h una temperatura de 28,78 °C (tabla 6.14), lo que representa 1,41 K menos que “B2b”. En cambio, el estar no registró temperaturas sobre el límite de confort y presentó una temperatura de 26,41 °C a las 18:00 h (tabla 6.14), lo que implica 1,81 K menos que el estar del caso “B2b”.

En el caso “A2b” y “B2b”, se puede observar que al incorporar Windcatcher, éste solo logra disminuir las temperaturas excesivas en el recinto al que sirve de manera directa, en este caso el estar. Sin lograr repetir esta condición al dormitorio, a pesar de que se considera la abertura de la puerta que conecta ambos recintos. Cabe destacar que, si bien el dormitorio no logra llevar sus temperaturas al rango de confort, tras el aporte del Windcatcher, si logra disminuir sus temperaturas en 1,74 K para el caso “A2b” y en 1,41 K para el caso “B2b”, lo cual significa una mejora significativa (figura 6.16).

VI) Análisis de confort térmico, variables A2c, AWC2c, B2c, BWC2c

La figura 6.17 presenta los resultados temperaturas operativas por recintos, para las variables A2c, AWC2c, B2c, BWC2c, respecto al rango de temperaturas de confort térmico establecido para el día de análisis. En cuanto a las cuatro variantes, estas tienen como base el ático dividido en un dormitorio y un estar, donde la ventana frontal y la puerta se encuentran abiertas, mientras que la ventana posterior está cerrada. Las variaciones responden a que en “A2c” la vivienda enfrenta con su fachada frontal el viento predominante (sur poniente), de la misma manera lo hace “AWC2c”, sin embargo, ésta última tiene incorporado un Windcatcher. Por otra parte, “B2c” es la vivienda con el viento predominante

incidiendo en su fachada lateral, al igual que “BWC2c”, con la diferencia que ésta última cuenta con un Windcatcher.

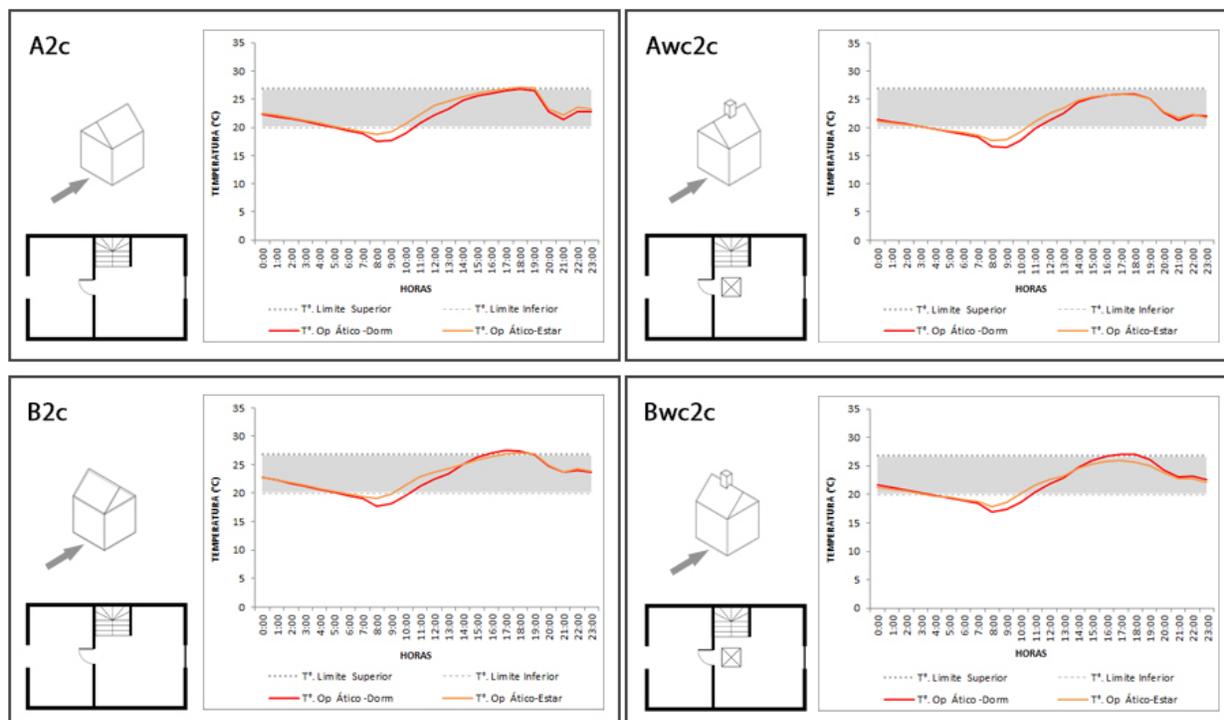


Figura 6.17: Gráficos de las temperaturas operativas (°C) por recinto, en referencia al rango de confort térmico establecido, para las variables A2c, AWC2c en la parte superior y B2c, BWC2c en la parte inferior de la imagen. Día de análisis (17 de enero).

Tabla 6.15: Valores de la temperatura operativa máxima (°C) de cada recinto, respecto la temperatura límite del rango de confort térmico (°C). Para las variables de análisis A2c, AWC2c, B2c, BWC2c.

	A2c		AWC2c		B2c		BWC2c	
Recinto	Dorm.	Estar	Dorm.	Estar	Dorm.	Estar	Dorm.	Estar
Temp op. Max.	26,81	27,12	25,9	25,75	27,45	26,92	27,11	25,94
Temp. lim. sup.	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9

La variable “A2c”, incorporó la abertura de la ventana de la fachada frontal (figura 6.17), lo cual generó que las temperaturas operativas del “dormitorio” no sobrepasaran el límite superior del rango de confort establecido, registrando una temperatura máxima de 26,81 °C a las 18:00 h. Mientras que el

estar sobrepasó el límite de confort durante tres horas, registrando una temperatura de 27,12 °C. Tras la incorporación del Windcatcher en “AWC2c” las temperaturas operativas para el dormitorio, se mantuvieron en el rango de confort, registrando una temperatura de 25,9 °C a las 18:00 h (tabla 6.15), lo que representa 0,91 K menos que el caso “A2c”. Por otra parte, el “estar” tampoco registró temperaturas sobre el límite, presentando una temperatura de 25,75 °C a las 18:00 h (tabla 6.15), lo que implica 1,37 K menos que el estar del caso A2c.

En lo que respecta a la evaluación de “B2c” (figura 6.17), esta alcanzó para el dormitorio una temperatura operativa máxima de 27,45 °C a las 17:00 h, superando el límite superior del rango de confort fue durante tres horas. El estar en cambio sobrepasó durante tres horas el límite de confort, registrando una temperatura de 26,92 °C. Al incorporar el Windcatcher en “BWC2c”, las temperaturas operativas para el “dormitorio” superaron el límite superior de confort durante dos horas, registrando para las 17:00 h una temperatura de 27,11 °C (tabla 6.15), lo que representa 0,34 K menos que el caso “B2c”. El estar no registró temperaturas sobre el límite de confort y para las 17:00 h registró una temperatura de 25,94 °C (tabla 6.15), representando 0,98 K menos que el estar del caso “B2c”.

En la variable “A2c” se puede apreciar que la incorporación del Windcatcher logra solucionar los problemas de confort que presenta el estar. El dormitorio por su parte, no solo mantiene en el rango de confort obtenido gracias a la acción de la ventana, sino que logra disminuir la temperatura máxima producto del trabajo en conjunto de la ventana y el Windcatcher. (figura 6.17). Por otro lado, la variable “B2c”, si bien con la incorporación del Windcatcher, logra dejar al estar en el rango de confort, no lo logra con el dormitorio, a pesar de que éste cuenta con el aporte de la ventilación entregada por la ventana (figura 6.17). Esto último se puede atribuir a lo establecido en el punto (6.3.1) referido a la disminución del flujo de aire ingresado a través de las ventanas, cuando el viento incide tangencialmente en estas y no de forma frontal como es el caso “A2c”.

VII) Análisis de confort térmico, variables A2d, AWC2d, B2d, BWC2d

La figura 6.18 presenta los Resultados temperaturas operativas por recintos, para las variables A2d, AWC2d, B2d, BWC2d, respecto al rango de temperaturas de confort térmico establecido para el día de análisis. En cuanto a las cuatro variantes, estas tienen como base el ático dividido en un dormitorio y un estar, donde ambas ventanas y la puerta se encuentran abiertas. Las variaciones responden a que en

“A2d” la vivienda enfrenta con su fachada frontal el viento predominante (sur poniente), de la misma manera lo hace “AWC2d”, sin embargo, ésta última tiene incorporado un Windcatcher. Por otra parte, “B2d” es la vivienda con el viento predominante incidiendo en su fachada lateral, al igual que “BWC2d”, con la diferencia que ésta última cuenta con un Windcatcher.

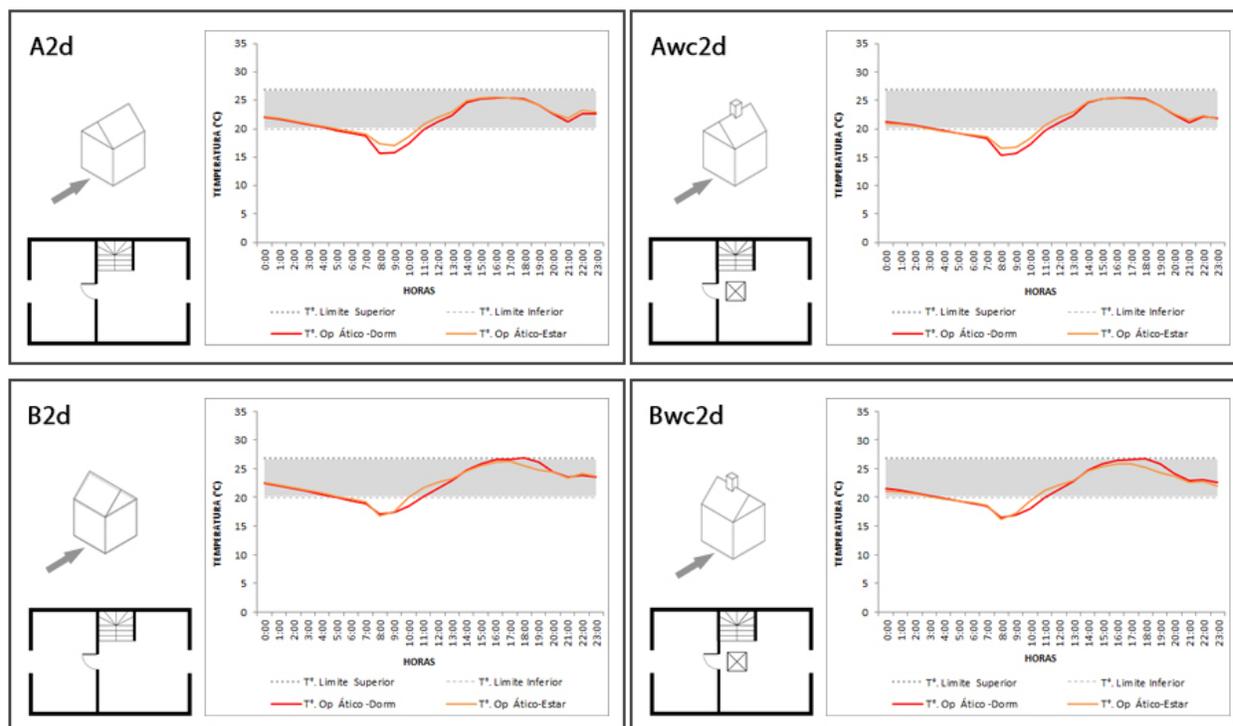


Figura 6.18: Gráficos de las temperaturas operativas (°C) por recinto, en referencia al rango de confort térmico establecido, para las variables A2d, AWC2d en la parte superior y B2d, BWC2d en la parte inferior. Día de análisis (17 de enero).

Tabla 6.16: Valores de la temperatura operativa máxima (°C) de cada recinto, respecto la temperatura límite del rango de confort térmico (°C). Para las variables de análisis A2d, AWC2d, B2b, BWC2d.

	A2d		AWC2d		B2d		BWC2d	
Recinto	Dorm.	Estar	Dorm.	Estar	Dorm.	Estar	Dorm.	Estar
Temp op. Max.	25,47	25,56	25,44	25,5	26,96	25,58	26,69	25,21
Temp. lim. sup.	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9

A raíz de que la variable “A2d”, cuenta con la apertura de ambas ventanas (figura 6.18) las temperaturas operativas del dormitorio no sobrepasaran el límite superior del rango de confort establecido, alcanzando una temperatura máxima de 25,47 °C a las 16:00 h. El estar por su parte tampoco sobrepasó el límite de confort, registrando una temperatura de 25,56 °C. Con la incorporación del Windcatcher “AWC2d” las temperaturas operativas para el dormitorio, se mantuvieron en el rango de confort, registrando para las 16:00 h una temperatura de 25,44 °C (tabla 6.16), lo que representa 0,03 K menos que “A2d”. De la misma manera, el estar tampoco registró temperaturas sobre el límite, presentando para las 16:00 h una temperatura de 25,5 °C (tabla 6.16), representando 0,06 K menos que el estar del caso “A2d”.

En lo que refiere a la variable “B2d” (figura 6.18), esta alcanzó una temperatura operativa máxima para el dormitorio de 26,96 °C a las 18:00 h, que correspondió a la hora que se sobrepasó el límite superior del rango de confort. El estar, en cambio, no sobrepasó el límite de confort, registrando una temperatura de 25,58 °C a las 18:00 h. Con la incorporación del Windcatcher en “BWC2d” la temperatura operativa máxima para el dormitorio fue de 26,69 °C registrada a las 18:00 h, representando 0,27 K menos que “B2d”, no superando con esto el límite superior de confort. Lo mismo ocurrió con el estar el cual registró una máxima de temperatura de 25,21 °C lo cual representa 0,37 K menos que el estar del caso “B2d” (tabla 6.16).

En el caso “A2d y B2d”, se puede apreciar baja incidencia tras incorporar el Windcatcher, particularmente en el caso “A2d”, donde el aporte es prácticamente mínimo en relación a las temperaturas obtenidas con la ventilación cruzada generada con ambas ventanas abiertas (figura 6.18). Sin embargo, en el caso “BWC2D” si bien la incidencia del Windcatcher es baja, logra dejar las temperaturas operativas del dormitorio dentro del rango de confort (tabla 6.16). Este último fenómeno originado, porque a diferencia de “A2d”, la ventana del dormitorio en “B2d”, queda expuesta al norponiente y por defecto a mayores ganancias solares (ver anexo B), a lo cual se suma que el flujo de aire ingresado por las ventanas en esta orientación, es inferior al caso “A2d”. Generando mayores temperaturas operativas para el caso base, las cuales son niveladas gracias a la acción del Windcatcher en “BWC2d”.

VIII) Análisis de confort térmico, variables A3a, AWC3a, B3a, BWC3a

La figura 6.19 presenta los resultados temperaturas operativas por recintos, para las variables A3a, AWC3a, B3a, BWC3a, respecto al rango de temperaturas de confort térmico establecido para el día de análisis. En cuanto a las cuatro variantes, estas tienen como base al ático dividido en dos dormitorios y un estar, con sus dos ventanas y puertas cerradas. Las variaciones responden a que en “A3a” la vivienda enfrenta con su fachada frontal el viento predominante (sur poniente), de la misma manera lo hace “AWC3a”, sin embargo, ésta última tiene incorporado un Windcatcher. Por otra parte, “B3a” es la vivienda con el viento predominante incidiendo en su fachada lateral, al igual que “BWC3a”, con la diferencia que ésta última cuenta con un Windcatcher.

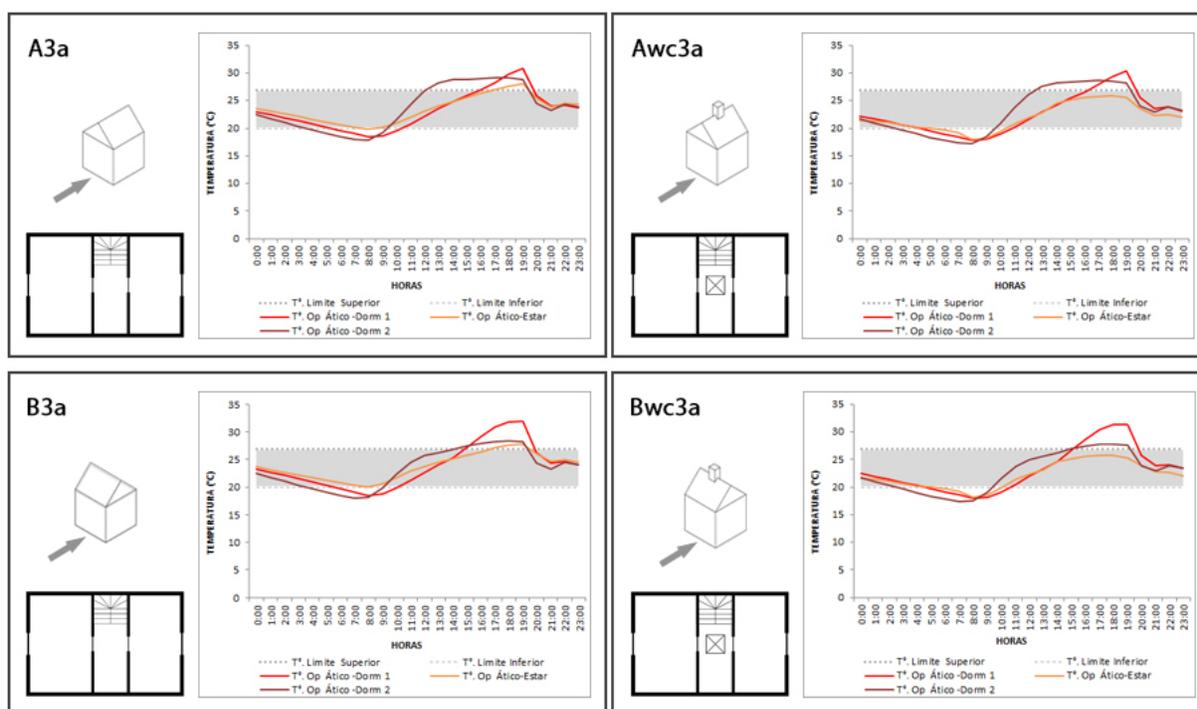


Figura 6.19: Gráficos de las temperaturas operativas (°C) por recinto, en referencia al rango de confort térmico establecido, para las variables A3a, AWC3a en la parte superior y B3a, BWC3a en la parte inferior. Día de análisis (17 de enero).

Tabla 6.17: Valores de la temperatura operativa máxima (°C) de cada recinto, respecto la temperatura límite del rango de confort térmico (°C). Para las variables de análisis A3a, AWC3a, B3a, BWC3a.

	A3a			AWC3a			B3a			BWC3a		
Recinto	Dorm. 1	Estar	Dorm. 2									
Temp op. Max.	30,88	28,07	28,81	30,32	25,51	28,2	31,93	27,81	27,92	31,33	25,34	27,56
Temp. lim. sup.	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9

La variable “A3a”, que considera la subdivisión del ático en dos dormitorios y un estar central (figura 6.19), registró para el dormitorio 1, una temperatura máxima de 30,88 °C a las 19:00 h, sobrepasando durante 4 horas el límite superior del rango de confort establecido. Mientras que el estar sobrepasó durante tres horas el límite de confort, con una temperatura de 28,07 °C para la misma hora. Finalmente, el dormitorio 2 sobrepasó durante siete horas el límite de confort, registrando una temperatura de 28,81 °C. Por otra parte, al incorporar el Windcatcher en “AWC3a” las temperaturas operativas para el dormitorio 1, superaron el límite del rango de confort durante tres horas, registrando para las 19:00 h una temperatura de 30,32 °C (tabla 6.17), lo que representa 0,56 K menos que “A3a”. El estar por su lado no registró temperaturas sobre el límite de confort, con una máxima de 25,51 °C a las 19:00 h (tabla 6.17), representando 2,56 K menos que el estar del caso “A3a”. Finalmente, el dormitorio 2 sobrepasó durante 7 horas el límite de confort, registrando una temperatura de 28,2 °C (tabla 6.17), lo que representa 0,61 K menos que el dormitorio 2 del caso “A3a”.

Respecto a la evaluación de “B3a” (figura 6.19), esta arrojó para el dormitorio 1, una temperatura operativa máxima de 31,93 °C a las 19:00 h, mientras que el límite superior del rango de confort fue superado durante 5 horas. Por otra parte, el estar sobrepasó durante tres horas el límite de confort, con una temperatura de 27,81 °C. Finalmente el dormitorio 2 sobrepasó durante seis horas el límite de confort, registrando una temperatura de 27,92 °C. Luego Con la incorporación del Windcatcher en “BWC3a” las temperaturas operativas para el dormitorio 1, superaron el límite del rango de confort durante cuatro horas, registrando para las 19:00 h una temperatura de 31,33 °C (tabla 6.17), lo que representa 0,6 K menos que lo registrado en “B3a”. El estar por su parte, no registró temperaturas sobre el límite de confort alcanzando una máxima de 25,34 °C a las 19:00 h (tabla 6.17), representando 2,47 K menos que el estar del caso “B3a”. Por último, el dormitorio 2 sobrepasó durante cinco horas el límite de confort, registrando una temperatura de 27,56 °C (tabla 6.17), lo que significa 0,36 K menos que el dormitorio 2 registrado en “B3a”.

En fin, podemos establecer que tanto para la variable “AWC3a” como para “BWC3a”, la incorporación del Windcatcher solo impactó en la disminución de las temperaturas operativas del estar, recinto ubicado directamente bajo el Windcatcher y en efecto fue el único recinto que logró llevar sus temperaturas al rango de confort. Quedando ambos dormitorios con temperaturas operativas sobre el límite superior, presentando una mínima disminución a pesar de la incorporación del Windcatcher. Esto último atribuible a la desconexión de los flujos por parte de los dormitorios, producto del cierre de las puertas considerado para esta variable de análisis (figura 6.19).

Cabe señalar la diferencia del comportamiento de las temperaturas operativas en relación al cambio de orientación de la vivienda, ya que al estar cerradas las ventanas, las ganancias solares cobran mayor relevancia (Anexo B). Sin embargo, el estar por tratarse de un recinto acotado, sin ventanas y con las puertas cerradas, presentó una disminución en sus temperaturas operativas similar para ambos casos tras la acción del Windcatcher, registrando una reducción de 2,56 K para el caso “AWC3a” y de 2,47 K para el caso “BWC3a”. Lo cual confirma lo establecido en la evaluación del punto 6.4.2 que plantea que, ante el cambio de orientación de la vivienda, el Windcatcher presenta una mínima variación en los flujos de viento ingresados, a diferencia de la ventilación a través de ventanas, donde si influye considerablemente el cambio de orientación.

IX) Análisis de confort térmico, variables A3b, AWC3b, B3b, BWC3b

La figura 6.20 presenta los resultados temperaturas operativas por recintos, para las variables A3b, AWC3b, B3b, BWC3b, respecto al rango de temperaturas de confort térmico establecido para el día de análisis. En cuanto a las cuatro variantes, estas tienen como base al ático dividido en dos dormitorios y un estar, donde ambas ventanas se encuentran cerradas con las puertas interiores abiertas. Las variaciones responden a que en “A3b” la vivienda enfrenta con su fachada frontal el viento predominante (sur poniente), de la misma manera lo hace “AWC3b”, sin embargo, ésta última tiene incorporado un Windcatcher. Por otra parte, “B3b” es la vivienda con el viento predominante incidiendo en su fachada lateral, al igual que “BWC3b”, con la diferencia que ésta última cuenta con un Windcatcher.

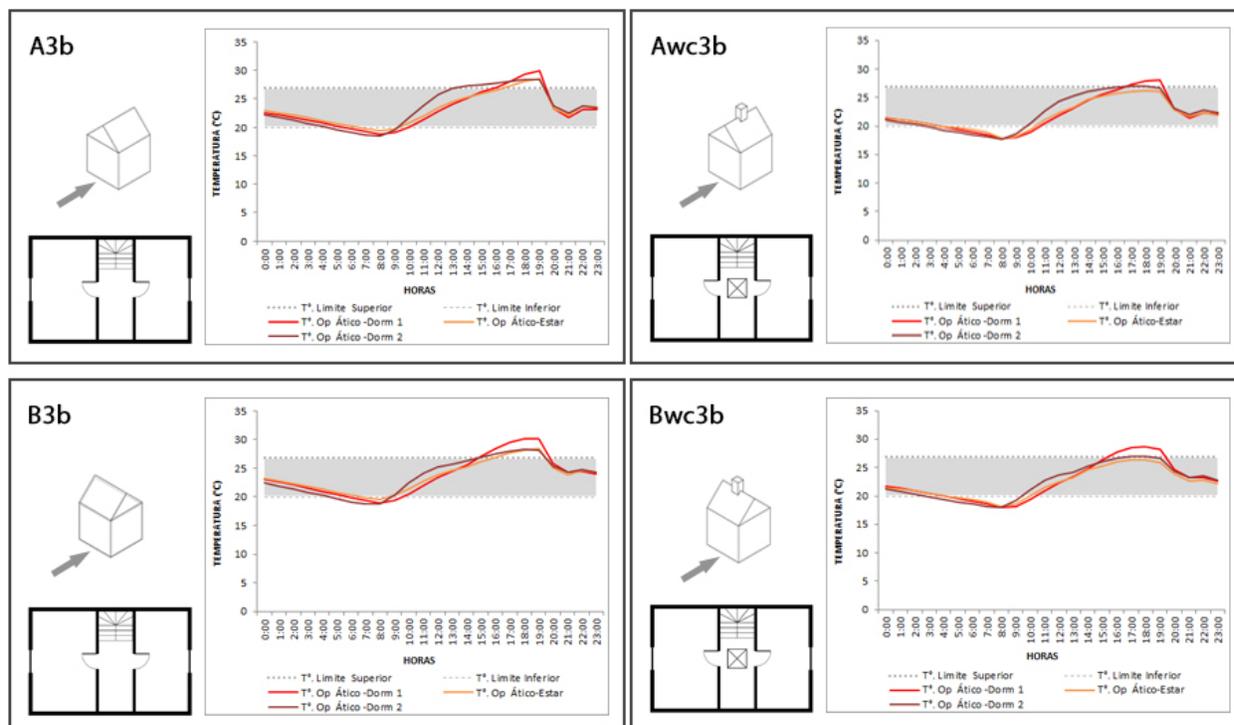


Figura 6.20: Gráficos de las temperaturas operativas (°C) por recinto, en referencia al rango de confort térmico establecido, para las variables A3b, AWC3b en la parte superior y B3b, BWC3b en la parte inferior. Día de análisis (17 de enero).

Tabla 6.18: Valores de la temperatura operativa máxima (°C) de cada recinto, respecto la temperatura límite del rango de confort térmico (°C). Para las variables de análisis A3b, AWC3b, B3b, BWC3b.

	A3b			AWC3b			B3b			BWC3b		
Recinto	Dorm. 1	Estar	Dorm. 2	Dorm. 1	Estar	Dorm. 2	Dorm. 1	Estar	Dorm. 2	Dorm. 1	Estar	Dorm. 2
Temp op. Max.	29,93	28,49	28,39	28,12	25,99	26,74	30,14	28,21	28,25	28,7	26,33	26,96
Temp. lim. sup.	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9

En la evaluación de la variable “A3b” (figura 6.20), las temperaturas operativas registradas para el dormitorio 1 sobrepasaron durante cuatro horas el límite superior del rango de confort establecido, alcanzando una temperatura máxima de 29,93 °C a las 19:00 h. Mientras que el estar sobrepasó en tres horas el límite de confort, con una temperatura de 28,49 °C para la misma hora. Finalmente, el dormitorio 2 sobrepasó en seis horas el límite de confort, registrando una temperatura de 28,39 °C. Con la incorporación del Windcatcher “AWC3b” las temperaturas operativas para el dormitorio 1, estuvieron sobre el límite superior de confort durante tres horas, registrando para las 19:00 h una temperatura

máxima de 28,12 °C (tabla 6.18), lo que representó 1,81 K menos que “A3b”. Por su parte el estar no registró temperaturas sobre el límite de confort, presentando para las 19:00 h una temperatura de 25,99 °C (tabla 6.18), lo que significa 2,5 K menos que el estar del caso “A3b”. Finalmente, el dormitorio 2 superó en dos horas el límite de confort, registrando una temperatura de 26,74 °C, lo que representa 1,65 K menos que el dormitorio 2 del caso “A3b” (tabla 6.18).

En lo que refiere a la variable “B3b” (figura 6.20), esta alcanzó para el dormitorio 1 una temperatura operativa máxima de 30,14 °C a las 18:00 h, mientras que el límite superior del rango de confort fue superado durante cinco horas. El estar, por su parte, sobrepasó durante cuatro horas el límite de confort, con una temperatura de 28,21 °C. Finalmente el dormitorio 2 sobrepasó durante seis horas el límite de confort, registrando una temperatura de 28,25 °C. En cambio, al incorporar el Windcatcher en “BWC3b” las temperaturas operativas para el dormitorio 1, superaron el límite superior durante cuatro horas, registrando para las 18:00 h una temperatura máxima de 28,7 °C (tabla 6.18), lo que representa 1,44 K menos que “B3b”. El estar por otro lado, no registró temperaturas sobre el límite de confort y para las 18:00 h presentó una temperatura de 26,33 °C (tabla 6.18), lo que significa 1,88 K menos que el estar del caso “B3b”. Por último, el dormitorio 2 sobrepasó durante dos horas el límite de confort, registrando una temperatura de 26,96 °C (tabla 6.18), lo que representa 1,29 K menos que el dormitorio 2 del caso “B3b”.

En la evaluación de las variables “AWC3b” como “BWC3b”, la incorporación del Windcatcher, al igual que en la evaluación anterior, logró disminuir las temperaturas operativas del estar. Sin embargo, por el hecho de que estas variables consideran la apertura de las puertas, el Windcatcher logro ampliar su influencia a los recintos contiguos, lo cual, si bien, no consiguió ajustar al rango de confort a la totalidad de los recintos, si disminuyó considerablemente sus temperaturas, logrando dejar dentro del rango de confort al dormitorio 2 en “AWC3b” (tabla 6.18).

X) Análisis de confort térmico, variables A3c, AWC3c, B3c, BWC3c

La figura 6.21 presenta los resultados temperaturas operativas por recintos, para las variables A3c, AWC3c, B3c, BWC3c, respecto al rango de temperaturas de confort térmico establecido para el día de análisis. En cuanto a las cuatro variantes, estas tienen como base al ático dividido en dos dormitorios y un estar, donde la ventana frontal y ambas puertas se encuentran abiertas, mientras que la ventana posterior está cerrada. Las variaciones responden a que en “A3c” la vivienda enfrenta con su fachada frontal el viento predominante (sur poniente), de la misma manera lo hace “AWC3c”, sin embargo, ésta

última tiene incorporado un Windcatcher. Por otra parte, “B3c” es la vivienda con el viento predominante incidiendo en su fachada lateral, al igual que “BWC3c”, con la diferencia que ésta última cuenta con un Windcatcher.

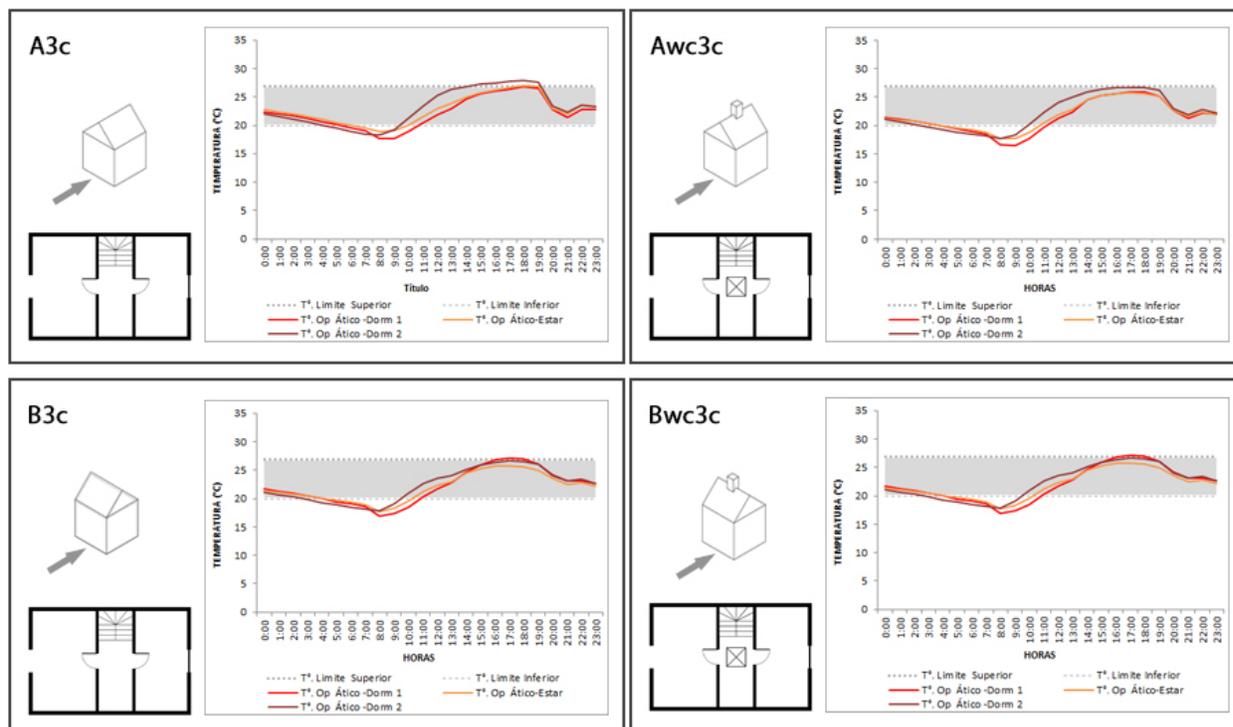


Figura 6.21: Gráficos de las temperaturas operativas (°C) por recinto, en referencia al rango de confort térmico establecido, para las variables A3c, AWC3c en la parte superior y B3c, BWC3c en la parte inferior. Día de análisis (17 de enero).

Tabla 6.19: Valores de la temperatura operativa máxima (°C) de cada recinto, respecto la temperatura límite del rango de confort térmico (°C). Para las variables de análisis A3c, AWC3c, B3c, BWC3c.

	A3c			AWC3c			B3c			BWC3c		
Recinto	Dorm. 1	Estar	Dorm. 2	Dorm. 1	Estar	Dorm. 2	Dorm. 1	Estar	Dorm. 2	Dorm. 1	Estar	Dorm. 2
Temp op. Max.	26,75	26,96	27,87	25,89	25,64	26,67	27,34	26,94	27,59	26,97	25,6	26,49
Temp. lim. sup.	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9

En la evaluación de la variable “A3c” (figura 6.21), las temperaturas operativas del dormitorio 1 no sobrepasaron el límite superior del rango de confort establecido, alcanzando una temperatura máxima de 26,75 °C a las 18:00 h. Mientras que el estar sobrepasó durante dos horas el límite de confort, con una temperatura de 26,96 °C para la misma hora. De igual modo, el dormitorio 2 sobrepasó en seis horas

el límite de confort, registrando una temperatura de 27,87 °C. Con la incorporación del Windcatcher en “AWC3c” ninguno de los tres recintos superó el límite de confort establecido. Registrando el dormitorio 1, a las 18:00 h, una temperatura máxima de 25,89 °C, lo que representa 0,86 K menos que “A3c” (tabla 6.19). El estar por su parte, registró una temperatura de 25,64 °C a las 18:00 h (tabla 6.19), representando 1,32 K menos que el estar en el caso “A3c”. Mientras que el dormitorio 2 presentó una temperatura de 26,67 °C (tabla 6.19), lo que significa 1,2 K menos que el dormitorio 2 del caso “A3c”.

Respecto a la evaluación de “B3c” (figura 6.21), esta alcanzó para el dormitorio 1, una temperatura operativa máxima de 27,34 °C a las 18:00 h, mientras que el límite superior del rango de confort fue superado durante tres horas. El estar, por otra parte, sobrepasó durante una hora el límite de confort, con una temperatura de 26,94 °C. Mientras que el dormitorio 2 superó durante cuatro horas el límite de confort, registrando una temperatura de 27,56 °C. Al incorporar el Windcatcher en “BWC3c” las temperaturas operativas para el dormitorio 1, superaron el límite de confort en dos horas, registrando su temperatura máxima de 26,97 °C a las 18:00 h (tabla 6.19), lo que representa 0,37 K menos que “B3c”. El estar por su parte no registró temperaturas sobre el límite de confort y presentó una temperatura de 25,6 °C (tabla 6.19), lo que significa 1,34 K menos que el estar del caso “B3c”. De igual forma, el dormitorio 2 tampoco sobrepasó el límite de confort, registrando una temperatura de 26,49 °C (tabla 6.19), lo que representa 1,1 K menos que el dormitorio 2 del caso “B3c”.

Tanto en la evaluación “AWC3c” como “BWC3c” se observa el impacto en la disminución de las temperaturas operativas del estar y dormitorio tras la incorporación del Windcatcher combinado con el aporte de la ventana de la fachada frontal (figura 6.21). Logrando situar dentro del rango de confort el estar y los dormitorios para ambos casos, con excepción del dormitorio 1 del caso “BWC3C” que, si bien no quedó dentro del rango, quedó en el límite de este (tabla 6.19). La menor disminución de las temperaturas para este último recinto se origina, porque a diferencia de “A3c”, la ventana del dormitorio 1 en “B3c”, queda expuesta al norponiente y por defecto a mayores ganancias solares (ver anexo B), a lo cual se suma que el flujo de aire ingresado por las ventanas en esta orientación, es inferior al caso “A3c”. Generando mayores temperaturas operativas para el caso base, las cuales no alcanzan a ser controladas por la acción conjunta de la ventana y el Windcatcher.

XI) Análisis de confort térmico, variables A3d, AWC3d, B3d, BWC3d

La figura 6.22 presenta los resultados temperaturas operativas por recintos, para las variables A3d, AWC3d, B3d, BWC3d, respecto al rango de temperaturas de confort térmico establecido para el día de

análisis. En cuanto a las cuatro variantes, estas tienen como base al ático dividido en dos dormitorios y un estar, donde ambas ventanas y puertas se encuentran abiertas. Las variaciones responden a que en “A3d” la vivienda enfrenta con su fachada frontal el viento predominante (sur poniente), de la misma manera lo hace “AWC3d”, sin embargo, ésta última tiene incorporado un Windcatcher. Por otra parte, “B3d” es la vivienda con el viento predominante incidiendo en su fachada lateral, al igual que “BWC3d”, con la diferencia que ésta última cuenta con un Windcatcher.

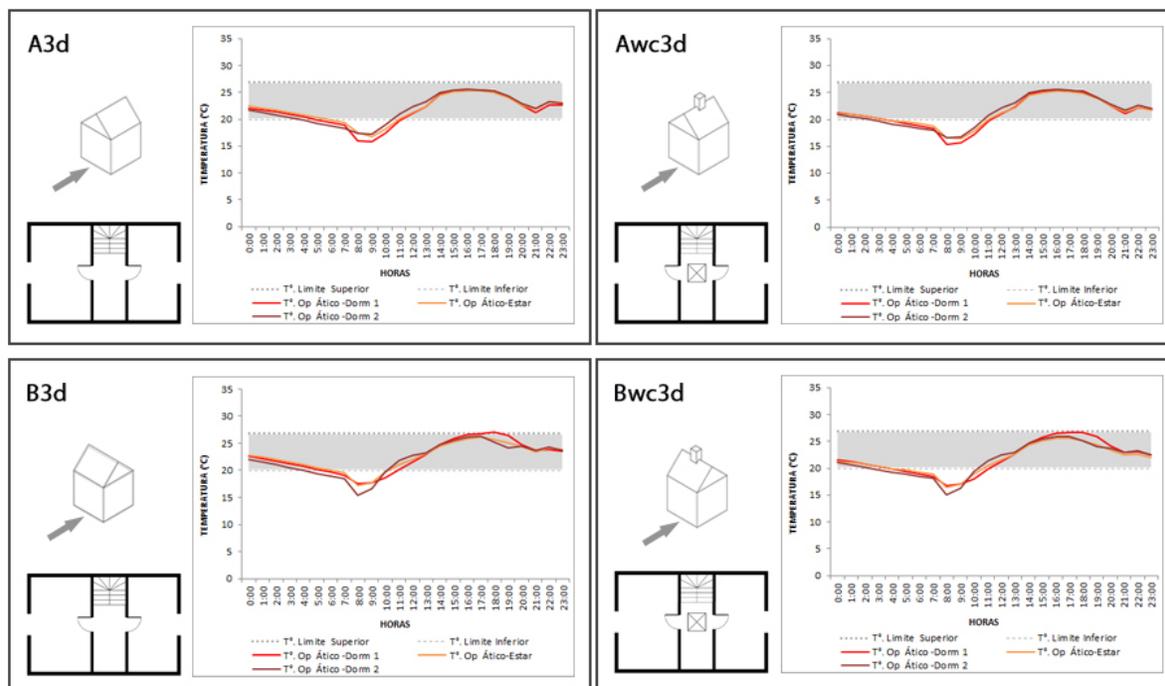


Figura 6.22: Gráficos de las temperaturas operativas (°C) por recinto, en referencia al rango de confort térmico establecido, para las variables A3d, AWC3d en la parte superior y B3d, BWC3d en la parte inferior. Día de análisis (17 de enero).

Tabla 6.20: Valores de la temperatura operativa máxima (°C) de cada recinto, respecto la temperatura límite del rango de confort térmico (°C). Para las variables de análisis A3d, AWC3d, B3d, BWC3d.

	A3d			AWC3d			B3d			BWC3d		
Recinto	Dorm. 1	Estar	Dorm. 2	Dorm. 1	Estar	Dorm. 2	Dorm. 1	Estar	Dorm. 2	Dorm. 1	Estar	Dorm. 2
Temp op. Max.	25,46	25,31	25,65	25,43	25,24	25,58	27,07	25,7	25,28	26,7	25,18	25,15
Temp. lim. sup.	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9	26,9

En la evaluación de la variable “A3d” (figura 6.22), ninguno de los tres recintos sobrepasó el límite superior del rango de confort establecido. Registrando el dormitorio 1 una temperatura máxima de 25,46 °C a las 16:00 h. El estar por su parte presentó una temperatura de 25,31 °C y finalmente, el

dormitorio 2 registró una temperatura de 25,65 °C a igual hora. Luego con la incorporación del Windcatcher en “AWC3d” se mantuvieron las temperaturas de los tres recintos bajo el límite superior del rango de confort. Con una temperatura máxima para el dormitorio 1, de 25,43 °C registrada a las 16:00 h (tabla 6.20), lo que representó 0,03 K menos que “A3d”. Por su parte el estar registró una temperatura de 25,24 °C a las 16:00 h (tabla 6.20), lo que significó 0,07 K menos que el estar del caso “A3d”. Finalmente, el dormitorio 2 registró una temperatura de 25,28 °C (tabla 6.20), lo que representó 0,07 K menos que el mismo recinto en el caso “A3d”.

Respecto a la evaluación de “B3d” (figura 6.22), esta alcanzó para el dormitorio 1 una temperatura operativa máxima de 27,07 °C a las 18:00 h, sobrepasando el límite superior del rango de confort durante una hora. Por otra parte, los otros dos recintos restantes, no sobrepasaron el límite de confort. El estar registró una temperatura de 25,7 °C, mientras que el dormitorio 2 una temperatura de 25,28 °C. Con la incorporación del Windcatcher “BWC3d” las temperaturas operativas de ninguno de los tres recintos superaron el límite de confort. El dormitorio 1 registró una temperatura máxima de 26,7 °C a las 18:00 h (tabla 6.20), lo que representó 0,37 K menos que “B3d”. El estar por otro lado registró una temperatura de 25,18 °C (tabla 6.20) 0,52 K menos que el mismo recinto en “B3d”. Por último, el dormitorio 2 registró una temperatura de 25,15 °C (tabla 6.20), 0,13 K menos que el dormitorio 2 en el caso “B3d”.

En el caso “AWC3d” y “BWC3d”, se puede apreciar baja incidencia tras incorporar el Windcatcher, particularmente en el caso “A3d”, donde el aporte es prácticamente mínimo en relación a las temperaturas obtenidas con la ventilación cruzada generada con ambas ventanas abiertas (figura 6.22). Sin embargo, en el caso “BWC3d” si bien la incidencia del Windcatcher es baja, logra llevar al rango de confort las temperaturas operativas del dormitorio 1, el cual se encontraban sobre el límite superior del rango de confort en la opción “B3d” (tabla 6.20). El alza de las temperaturas para este último recinto se origina, porque a diferencia de “A3d”, la ventana del dormitorio 1 de “B3d”, queda expuesta al norponiente y por defecto a mayores ganancias solares (ver anexo B), además, se suma a esto que el flujo de aire ingresado por las ventanas en esta orientación, es inferior al caso “A3d”. Generando mayores temperaturas operativas para el caso base, las cuales son niveladas gracias a la acción del Windcatcher en “BWC3d”.

Resumen análisis de confort térmico para la matriz de evaluación interior

Finalmente se presenta un cuadro resumen de las temperaturas máximas obtenidas al interior del ático y su relación con la temperatura de 26,9 °C establecida como límite superior de confort, según el modelo de confort adaptativo con un 80% de aceptabilidad, para el día 17 de enero (figura 6.23)

		(A) Variación orientación viento frontal				(B) Variación orientación viento lateral																																																																																																											
		(A)		(AWC)		(B)		(BWC)																																																																																																									
Variable de uso	1 Variable diseño interior	<table border="1"> <tr><th colspan="2">A1a</th><th colspan="2">AWC1a</th></tr> <tr><td>Recinto</td><td>Ático</td><td>Ático</td><td></td></tr> <tr><td>Temp op. Max.</td><td>28,95</td><td>26,48</td><td></td></tr> </table>		A1a		AWC1a		Recinto	Ático	Ático		Temp op. Max.	28,95	26,48		<table border="1"> <tr><th colspan="2">A1b</th><th colspan="2">AWC1b</th></tr> <tr><td>Recinto</td><td>Ático</td><td>Ático</td><td></td></tr> <tr><td>Temp op. Max.</td><td>26,9</td><td>25,91</td><td></td></tr> </table>		A1b		AWC1b		Recinto	Ático	Ático		Temp op. Max.	26,9	25,91		<table border="1"> <tr><th colspan="2">A1c</th><th colspan="2">AWC1c</th></tr> <tr><td>Recinto</td><td>Ático</td><td>Ático</td><td></td></tr> <tr><td>Temp op. Max.</td><td>25,59</td><td>25,52</td><td></td></tr> </table>		A1c		AWC1c		Recinto	Ático	Ático		Temp op. Max.	25,59	25,52		<table border="1"> <tr><th colspan="2">B1a</th><th colspan="2">BWC1a</th></tr> <tr><td>Recinto</td><td>Ático</td><td>Ático</td><td></td></tr> <tr><td>Temp op. Max.</td><td>28,85</td><td>26,34</td><td></td></tr> </table>		B1a		BWC1a		Recinto	Ático	Ático		Temp op. Max.	28,85	26,34		<table border="1"> <tr><th colspan="2">B1b</th><th colspan="2">BWC1b</th></tr> <tr><td>Recinto</td><td>Ático</td><td>Ático</td><td></td></tr> <tr><td>Temp op. Max.</td><td>27,18</td><td>26,29</td><td></td></tr> </table>		B1b		BWC1b		Recinto	Ático	Ático		Temp op. Max.	27,18	26,29		<table border="1"> <tr><th colspan="2">B1c</th><th colspan="2">BWC1c</th></tr> <tr><td>Recinto</td><td>Ático</td><td>Ático</td><td></td></tr> <tr><td>Temp op. Max.</td><td>26,49</td><td>26,12</td><td></td></tr> </table>		B1c		BWC1c		Recinto	Ático	Ático		Temp op. Max.	26,49	26,12																													
	A1a		AWC1a																																																																																																														
	Recinto	Ático	Ático																																																																																																														
	Temp op. Max.	28,95	26,48																																																																																																														
	A1b		AWC1b																																																																																																														
	Recinto	Ático	Ático																																																																																																														
	Temp op. Max.	26,9	25,91																																																																																																														
	A1c		AWC1c																																																																																																														
	Recinto	Ático	Ático																																																																																																														
	Temp op. Max.	25,59	25,52																																																																																																														
	B1a		BWC1a																																																																																																														
	Recinto	Ático	Ático																																																																																																														
Temp op. Max.	28,85	26,34																																																																																																															
B1b		BWC1b																																																																																																															
Recinto	Ático	Ático																																																																																																															
Temp op. Max.	27,18	26,29																																																																																																															
B1c		BWC1c																																																																																																															
Recinto	Ático	Ático																																																																																																															
Temp op. Max.	26,49	26,12																																																																																																															
Variable de uso	2 Variable diseño interior	<table border="1"> <tr><th colspan="2">A2a</th><th colspan="2">AWC2a</th></tr> <tr><td>Recinto</td><td>Dorm. Estar</td><td>Dorm. Estar</td><td></td></tr> <tr><td>Temp op. Max.</td><td>30,95 27,95</td><td>30,38 25,61</td><td></td></tr> </table>		A2a		AWC2a		Recinto	Dorm. Estar	Dorm. Estar		Temp op. Max.	30,95 27,95	30,38 25,61		<table border="1"> <tr><th colspan="2">A2b</th><th colspan="2">AWC2b</th></tr> <tr><td>Recinto</td><td>Dorm. Estar</td><td>Dorm. Estar</td><td></td></tr> <tr><td>Temp op. Max.</td><td>29,93 28,4</td><td>28,19 26,04</td><td></td></tr> </table>		A2b		AWC2b		Recinto	Dorm. Estar	Dorm. Estar		Temp op. Max.	29,93 28,4	28,19 26,04		<table border="1"> <tr><th colspan="2">A2c</th><th colspan="2">AWC2c</th></tr> <tr><td>Recinto</td><td>Dorm. Estar</td><td>Dorm. Estar</td><td></td></tr> <tr><td>Temp op. Max.</td><td>26,81 27,12</td><td>25,9 25,75</td><td></td></tr> </table>		A2c		AWC2c		Recinto	Dorm. Estar	Dorm. Estar		Temp op. Max.	26,81 27,12	25,9 25,75		<table border="1"> <tr><th colspan="2">A2d</th><th colspan="2">AWC2d</th></tr> <tr><td>Recinto</td><td>Dorm. Estar</td><td>Dorm. Estar</td><td></td></tr> <tr><td>Temp op. Max.</td><td>25,47 25,56</td><td>25,44 25,5</td><td></td></tr> </table>		A2d		AWC2d		Recinto	Dorm. Estar	Dorm. Estar		Temp op. Max.	25,47 25,56	25,44 25,5		<table border="1"> <tr><th colspan="2">B2a</th><th colspan="2">BWC2a</th></tr> <tr><td>Recinto</td><td>Dorm. Estar</td><td>Dorm. Estar</td><td></td></tr> <tr><td>Temp op. Max.</td><td>31,98 27,71</td><td>31,39 25,44</td><td></td></tr> </table>		B2a		BWC2a		Recinto	Dorm. Estar	Dorm. Estar		Temp op. Max.	31,98 27,71	31,39 25,44		<table border="1"> <tr><th colspan="2">B2b</th><th colspan="2">BWC2b</th></tr> <tr><td>Recinto</td><td>Dorm. Estar</td><td>Dorm. Estar</td><td></td></tr> <tr><td>Temp op. Max.</td><td>30,19 28,22</td><td>28,78 26,41</td><td></td></tr> </table>		B2b		BWC2b		Recinto	Dorm. Estar	Dorm. Estar		Temp op. Max.	30,19 28,22	28,78 26,41		<table border="1"> <tr><th colspan="2">B2c</th><th colspan="2">BWC2c</th></tr> <tr><td>Recinto</td><td>Dorm. Estar</td><td>Dorm. Estar</td><td></td></tr> <tr><td>Temp op. Max.</td><td>27,45 26,92</td><td>27,11 25,94</td><td></td></tr> </table>		B2c		BWC2c		Recinto	Dorm. Estar	Dorm. Estar		Temp op. Max.	27,45 26,92	27,11 25,94		<table border="1"> <tr><th colspan="2">B2d</th><th colspan="2">BWC2d</th></tr> <tr><td>Recinto</td><td>Dorm. Estar</td><td>Dorm. Estar</td><td></td></tr> <tr><td>Temp op. Max.</td><td>26,96 25,58</td><td>26,69 25,21</td><td></td></tr> </table>		B2d		BWC2d		Recinto	Dorm. Estar	Dorm. Estar		Temp op. Max.	26,96 25,58	26,69 25,21	
	A2a		AWC2a																																																																																																														
	Recinto	Dorm. Estar	Dorm. Estar																																																																																																														
	Temp op. Max.	30,95 27,95	30,38 25,61																																																																																																														
	A2b		AWC2b																																																																																																														
	Recinto	Dorm. Estar	Dorm. Estar																																																																																																														
	Temp op. Max.	29,93 28,4	28,19 26,04																																																																																																														
	A2c		AWC2c																																																																																																														
	Recinto	Dorm. Estar	Dorm. Estar																																																																																																														
	Temp op. Max.	26,81 27,12	25,9 25,75																																																																																																														
	A2d		AWC2d																																																																																																														
	Recinto	Dorm. Estar	Dorm. Estar																																																																																																														
Temp op. Max.	25,47 25,56	25,44 25,5																																																																																																															
B2a		BWC2a																																																																																																															
Recinto	Dorm. Estar	Dorm. Estar																																																																																																															
Temp op. Max.	31,98 27,71	31,39 25,44																																																																																																															
B2b		BWC2b																																																																																																															
Recinto	Dorm. Estar	Dorm. Estar																																																																																																															
Temp op. Max.	30,19 28,22	28,78 26,41																																																																																																															
B2c		BWC2c																																																																																																															
Recinto	Dorm. Estar	Dorm. Estar																																																																																																															
Temp op. Max.	27,45 26,92	27,11 25,94																																																																																																															
B2d		BWC2d																																																																																																															
Recinto	Dorm. Estar	Dorm. Estar																																																																																																															
Temp op. Max.	26,96 25,58	26,69 25,21																																																																																																															
Variable de uso	3 Variable diseño interior	<table border="1"> <tr><th colspan="2">A3a</th><th colspan="2">AWC3a</th></tr> <tr><td>Recinto</td><td>Dorm. 1 Estar Dorm. 2</td><td>Dorm. 1 Estar Dorm. 2</td><td></td></tr> <tr><td>Temp op. Max.</td><td>30,88 28,07 28,81</td><td>30,32 25,51 28,2</td><td></td></tr> </table>		A3a		AWC3a		Recinto	Dorm. 1 Estar Dorm. 2	Dorm. 1 Estar Dorm. 2		Temp op. Max.	30,88 28,07 28,81	30,32 25,51 28,2		<table border="1"> <tr><th colspan="2">A3b</th><th colspan="2">AWC3b</th></tr> <tr><td>Recinto</td><td>Dorm. 1 Estar Dorm. 2</td><td>Dorm. 1 Estar Dorm. 2</td><td></td></tr> <tr><td>Temp op. Max.</td><td>29,93 28,49 28,39</td><td>28,12 25,99 26,74</td><td></td></tr> </table>		A3b		AWC3b		Recinto	Dorm. 1 Estar Dorm. 2	Dorm. 1 Estar Dorm. 2		Temp op. Max.	29,93 28,49 28,39	28,12 25,99 26,74		<table border="1"> <tr><th colspan="2">A3c</th><th colspan="2">AWC3c</th></tr> <tr><td>Recinto</td><td>Dorm. 1 Estar Dorm. 2</td><td>Dorm. 1 Estar Dorm. 2</td><td></td></tr> <tr><td>Temp op. Max.</td><td>26,75 26,96 27,87</td><td>25,89 25,64 26,67</td><td></td></tr> </table>		A3c		AWC3c		Recinto	Dorm. 1 Estar Dorm. 2	Dorm. 1 Estar Dorm. 2		Temp op. Max.	26,75 26,96 27,87	25,89 25,64 26,67		<table border="1"> <tr><th colspan="2">A3d</th><th colspan="2">AWC3d</th></tr> <tr><td>Recinto</td><td>Dorm. 1 Estar Dorm. 2</td><td>Dorm. 1 Estar Dorm. 2</td><td></td></tr> <tr><td>Temp op. Max.</td><td>25,46 25,31 25,65</td><td>25,43 25,24 25,58</td><td></td></tr> </table>		A3d		AWC3d		Recinto	Dorm. 1 Estar Dorm. 2	Dorm. 1 Estar Dorm. 2		Temp op. Max.	25,46 25,31 25,65	25,43 25,24 25,58		<table border="1"> <tr><th colspan="2">B3a</th><th colspan="2">BWC3a</th></tr> <tr><td>Recinto</td><td>Dorm. 1 Estar Dorm. 2</td><td>Dorm. 1 Estar Dorm. 2</td><td></td></tr> <tr><td>Temp op. Max.</td><td>31,93 27,81 27,92</td><td>31,33 25,34 27,56</td><td></td></tr> </table>		B3a		BWC3a		Recinto	Dorm. 1 Estar Dorm. 2	Dorm. 1 Estar Dorm. 2		Temp op. Max.	31,93 27,81 27,92	31,33 25,34 27,56		<table border="1"> <tr><th colspan="2">B3b</th><th colspan="2">BWC3b</th></tr> <tr><td>Recinto</td><td>Dorm. 1 Estar Dorm. 2</td><td>Dorm. 1 Estar Dorm. 2</td><td></td></tr> <tr><td>Temp op. Max.</td><td>30,14 28,21 28,25</td><td>28,7 26,33 26,96</td><td></td></tr> </table>		B3b		BWC3b		Recinto	Dorm. 1 Estar Dorm. 2	Dorm. 1 Estar Dorm. 2		Temp op. Max.	30,14 28,21 28,25	28,7 26,33 26,96		<table border="1"> <tr><th colspan="2">B3c</th><th colspan="2">BWC3c</th></tr> <tr><td>Recinto</td><td>Dorm. 1 Estar Dorm. 2</td><td>Dorm. 1 Estar Dorm. 2</td><td></td></tr> <tr><td>Temp op. Max.</td><td>27,34 26,94 27,59</td><td>26,97 25,6 26,49</td><td></td></tr> </table>		B3c		BWC3c		Recinto	Dorm. 1 Estar Dorm. 2	Dorm. 1 Estar Dorm. 2		Temp op. Max.	27,34 26,94 27,59	26,97 25,6 26,49		<table border="1"> <tr><th colspan="2">B3d</th><th colspan="2">BWC3d</th></tr> <tr><td>Recinto</td><td>Dorm. 1 Estar Dorm. 2</td><td>Dorm. 1 Estar Dorm. 2</td><td></td></tr> <tr><td>Temp op. Max.</td><td>27,07 25,7 25,28</td><td>26,7 25,18 25,15</td><td></td></tr> </table>		B3d		BWC3d		Recinto	Dorm. 1 Estar Dorm. 2	Dorm. 1 Estar Dorm. 2		Temp op. Max.	27,07 25,7 25,28	26,7 25,18 25,15	
	A3a		AWC3a																																																																																																														
	Recinto	Dorm. 1 Estar Dorm. 2	Dorm. 1 Estar Dorm. 2																																																																																																														
	Temp op. Max.	30,88 28,07 28,81	30,32 25,51 28,2																																																																																																														
	A3b		AWC3b																																																																																																														
	Recinto	Dorm. 1 Estar Dorm. 2	Dorm. 1 Estar Dorm. 2																																																																																																														
	Temp op. Max.	29,93 28,49 28,39	28,12 25,99 26,74																																																																																																														
	A3c		AWC3c																																																																																																														
	Recinto	Dorm. 1 Estar Dorm. 2	Dorm. 1 Estar Dorm. 2																																																																																																														
	Temp op. Max.	26,75 26,96 27,87	25,89 25,64 26,67																																																																																																														
	A3d		AWC3d																																																																																																														
	Recinto	Dorm. 1 Estar Dorm. 2	Dorm. 1 Estar Dorm. 2																																																																																																														
Temp op. Max.	25,46 25,31 25,65	25,43 25,24 25,58																																																																																																															
B3a		BWC3a																																																																																																															
Recinto	Dorm. 1 Estar Dorm. 2	Dorm. 1 Estar Dorm. 2																																																																																																															
Temp op. Max.	31,93 27,81 27,92	31,33 25,34 27,56																																																																																																															
B3b		BWC3b																																																																																																															
Recinto	Dorm. 1 Estar Dorm. 2	Dorm. 1 Estar Dorm. 2																																																																																																															
Temp op. Max.	30,14 28,21 28,25	28,7 26,33 26,96																																																																																																															
B3c		BWC3c																																																																																																															
Recinto	Dorm. 1 Estar Dorm. 2	Dorm. 1 Estar Dorm. 2																																																																																																															
Temp op. Max.	27,34 26,94 27,59	26,97 25,6 26,49																																																																																																															
B3d		BWC3d																																																																																																															
Recinto	Dorm. 1 Estar Dorm. 2	Dorm. 1 Estar Dorm. 2																																																																																																															
Temp op. Max.	27,07 25,7 25,28	26,7 25,18 25,15																																																																																																															

Figura 6.23: Cuadro resumen de las temperaturas operativas máximas registradas en el ático, marcando en rojo las temperaturas que superen los 26,9 °C que representa el límite superior del rango de confort establecido.

6.5 Conclusión capítulo 6

En relación al proceso de simulación, se puede constatar la capacidad del software IESVE, seleccionado en la evaluación de las variables planteadas, tanto en el comportamiento de los flujos de aire ingresados a la vivienda como en las temperaturas interiores obtenidas tras el desarrollo de la matriz de evaluación proyectada. Destacándose una buena relación entre agilidad del software y consistencia de resultados, lo que se torna de gran utilidad en fases de diseño o de implementación de estrategias de ventilación natural, particularmente en la toma de decisiones relacionadas con aberturas y condiciones de los configurantes.

Por otra parte, IES presenta un trabajo avanzado en la incorporación de un bloque pre modelado del Windcatcher comercial, reconocible e integrable al cálculo térmico y de flujos de aire para los modelos a evaluar. Sin embargo, se generaron dificultad en el simulador de ventilación natural, para conocer la velocidad del aire ingresado a los recintos a través del Windcatcher, limitándose a valores de flujo de aire volumétricamente expresado en l/s. Lo cual, si bien, es efectivo para cálculos de renovación de aire, no permite involucrar con más precisión la variable de velocidad de aire, para efectos de análisis de confort térmico, queda limitado a una velocidad de 0,2 m/s, que es el valor que asume la fórmula del simulador térmico del software para el cálculo de las temperaturas operativas dentro de los recintos.

En lo que refiere al proceso de evaluación interna del caso de estudio, la integración de los perfiles de exposición resultantes de la evaluación de los flujos externos (desarrollado en el capítulo 5) logró generar un escenario más contextualizado para las aberturas que actúan como fuentes de ingreso de aire, como es el caso de las ventanas y el Windcatcher que sirven al ático de la vivienda analizada.

Con respecto a la evaluación realizada para determinar el impacto en el desempeño de la ventilación natural tras el cambio de orientación de la vivienda frente a los vientos predominantes, en el caso de la ventilación a través de las ventanas, luego de analizar las variables A1c y B1c (ambas ventanas abiertas), la variable A1c, cuya fachada frontal enfrenta a los vientos predominantes, arrojó un flujo neto de ingreso de aire de 1508,5 l/s, mientras que para la vivienda que enfrenta los vientos con su fachada lateral (B1c), el flujo neto de ingreso por ventanas fue de 372 l/s. Esto permite establecer que, para efecto del flujo de ingreso de aire por ventanas, la orientación a los vientos incide significativamente en el potencial de ventilación. En cambio, al evaluar el impacto de la orientación respecto al ingreso de aire

a través del Windcatcher, para ambas orientaciones de la vivienda, este presentó un desempeño prácticamente igual.

En cuanto a la evaluación de las temperaturas operativas, tras lo descrito anteriormente, es posible interpretar los resultados en función de los flujos de aire involucrados en las variables desarrolladas. Dichas variantes responden a la “matriz de evaluación” propuesta en la metodología, la cual en primera instancia considera la orientación de la vivienda respecto a los vientos, luego contempla variables como aperturas de ventanas y puertas, así como también separaciones interiores. Estas últimas fueron organizadas en las siguientes series: 1, para el ático en su configuración como un recinto único; 2, para la opción que considera la subdivisión del ático en un dormitorio y un estar; 3, para la subdivisión del ático en dos dormitorios y un pequeño estar. Finalmente, todas las variables antes mencionadas fueron comparadas una a una con su versión con Windcatcher incorporado, con el objeto de ver el impacto de este último.

De esta manera, los resultados de las evaluaciones permitieron concluir en primera instancia, la efectiva alza de las temperaturas interiores que experimentaron los áticos de las viviendas en el verano. Lo cual se pudo evidenciar tanto en las variables cuyas ventanas permanecieron cerradas en ausencia de sus moradores, como en algunos de los casos que consideraron mayores rangos de abertura de ventanas. Llegando a sobrepasar en ambos casos el límite superior del rango de confort establecido para el día de análisis. A partir de lo anterior se consiguió establecer el aporte del Windcatcher en la disminución de las temperaturas operativas de los recintos que se encuentran bajo su área de influencia, alcanzando su mejor desempeño cuando asistió a espacios sin subdivisiones, como el caso del ático en la serie 1, donde el Windcatcher logró estabilizar sus temperaturas operativas, dentro del rango de confort. Por otro lado, para el caso de los áticos que contaban con subdivisiones interiores como en la serie 2 y 3, el Windcatcher obtuvo un impacto significativo en los recintos que se encontraban bajo su influencia directa, como es el caso del estar. Sin embargo, para el caso de los recintos contiguos al área directa de influencia, si bien estos consiguieron disminuir sus temperaturas gracias a la abertura de puertas, no lograron quedar dentro del rango de confort, lo cual solo se consiguió en complemento con a lo menos una ventana abierta. Del mismo modo se evidenció que, frente a la opción de contar con ventilación cruzada, mediante la abertura de ambas ventanas, el aporte del Windcatcher se minimizaba, particularmente en el caso de la vivienda cuyas ventanas enfrentaban la dirección del viento predominante. Mientras que para el caso de las viviendas que recibían los flujos de viento de manera

tangencial a sus ventanas, el Windcatcher consiguió complementar el aporte de las ventanas en la estabilización de las temperaturas interiores.

Capítulo 7

Conclusiones y futuras líneas de investigación

En este capítulo se desarrollan las conclusiones y discusiones en torno a los objetivos generales y específicos de este trabajo de tesis, los cuales sintetizan y aúnan lo concluido en cada uno de los capítulos desarrollados. Por otra parte, se esbozan futuras líneas de investigación a partir de los hallazgos de esta investigación.

7.1 Conclusiones en torno al objetivo general

Objetivo general: Evaluar el potencial de la ventilación natural para controlar sobrecalentamientos en viviendas de condominios urbanos de ciudades con climas templados húmedos como el de Concepción, al incorporar la tecnología de torres de viento al diseño y construcción de viviendas, a través del estudio de su integración a la arquitectura, agrupación urbana, clima local y establecimiento de directrices de diseño.

Tomando en consideración el objetivo general de esta investigación, en primera instancia se concluye la pertinencia de la torre de viento como solución de ventilación natural al problema de sobrecalentamiento en viviendas en climas templados húmedos. Lo cual fue llevado a cabo a partir de la integración de variables urbanas asociadas a las condiciones que presenta el conjunto residencial y variables arquitectónicas vinculadas a la configuración interna de los recintos, así como también variantes de uso, dadas por los ocupantes de las viviendas. Lo antes planteado, genera una contribución al estado del conocimiento, inclinado principalmente en el desempeño de la torre de viento como elemento y el funcionamiento de sus partes. Proponiendo así un marco unificador de análisis a través de una metodología multi-escalar que va desde decisiones de diseño y configuración a escala urbana hasta la edificación como fenómeno de interacción directa con la torre de viento.

El estudio de las tipologías de viviendas pertenecientes al modelo de condominio, común y representativo de la actual oferta inmobiliaria en las ciudades del centro-sur de Chile, permitió identificar problemas de sobrecalentamiento en verano por limitaciones de alternativas de ventilación natural, producto de la proximidad entre viviendas, originada fundamentalmente por la lógica de la máxima cabida en un lote. Esto último, genera viviendas con fachadas laterales con mínimas o nulas aberturas en un sentido, mientras que en la fachada frontal se concentran las ventanas. Si bien, las inmobiliarias repiten de manera estandarizada tanto la configuración del conjunto, como el de la vivienda; esto presenta un potencial de ventilación en la zona de las cumbreras, ya que como todas las viviendas poseen prácticamente la misma altura y a la vez son parte de conjuntos que se extienden en grandes superficies, el viento fluye de forma ininterrumpida sobre sus cumbreras, lo cual puede ser aprovechado por un sistema de captación y evacuación vertical como las torres de viento.

Bajo esta inquietud, se comparó el potencial de ventilación a través de las ventanas para el conjunto de viviendas, considerando la incidencia del viento en sentido lateral y frontal, registrándose un flujo sustancialmente menor para la primera opción. Sin embargo, al evaluar el flujo entrante por la torre de viento, para ambas opciones de orientación, el valor fue prácticamente el mismo, concluyendo en el potencial de la torre, dada su naturaleza multidireccional.

Por otra parte, al desarrollar la matriz de evaluación interior, enfocada en variables de diseño del ático, se pudo confirmar el aporte de la incorporación de la torre de viento en la disminución de las temperaturas operativas, particularmente de los recintos que están próximos a su área de influencia, alcanzando su mejor desempeño en los áticos que no presentan subdivisiones interiores. Consiguiendo en estos últimos no solo inscribir las temperaturas dentro del rango de confort, sino que incluso logrando registrar diferenciales de temperatura de 2,51 K respecto del caso base sin torre de viento.

Para aquellos casos en que el ático se subdividiera en un dormitorio y estar, se logró establecer que la torre de viento obtuvo mayor impacto en las temperaturas del recinto que asistía de forma directa. Esto nos permite concluir que al diseñar áticos que contemplen subdivisiones, resulta más eficiente que los recintos que no dispongan con la asistencia directa de la torre, cuenten con una ventana con la mejor orientación a los vientos predominantes. Esto último podría ser de gran utilidad para viviendas adosadas o que no dispongan de la posibilidad de abrir ventanas en todos los recintos.

Con respecto a la división del ático en dos dormitorios y un pequeño estar, se corroboró lo advertido en los casos anteriores, referido a la influencia de la torre de viento sobre el recinto directamente asistido,

en este caso el estar; mientras que en los dormitorios se verificó baja influencia por parte de la torre, a pesar de mantener las puertas abiertas. Lo cual permite concluir que frente a esta variable de diseño interior la torre de viento podría no justificarse.

Por otra parte, tras analizar las variables de uso, particularmente aquellas referidas a los periodos de ventanas cerradas, causadas principalmente por motivos de seguridad, tanto en la noche, como en las horas de ausencia de los moradores, se pudo concluir la alta pertinencia de la torre de viento, ya que esta logró mantener las temperaturas operativas en el rango de confort, en la mayoría de los casos analizados, donde la torre no solo representó la posibilidad de ventilación segura durante el día, sino que también ofreció la opción de ventilación nocturna. En cambio, en lo que concierne al escenario de ventilación cruzada, generado a partir de la abertura constante de ambas ventanas, la torre de viento no presentó un mayor aporte en la disminución de las temperaturas operativas de lo ya entregado por las ventanas.

En lo que refiere a la metodología de análisis, se logró constatar la capacidad del software IESVE, destacándose la buena relación entre agilidad y consistencia de resultados, lo que se torna de gran utilidad en fases de diseño o de implementación de estrategias de ventilación natural, particularmente en la toma de decisiones de configuración del conjunto residencial como de la vivienda en sí misma. Sin embargo, a pesar de conseguir analizar exterior e interiormente el caso de estudio, no fue factible integrar de manera más directa dichos análisis, dado que el software aún no está implementado para llevar a cabo un análisis interno en CFD, considerando la torre de viento como conector entre entorno externo e interno. Ante lo cual, la presente tesis generó una metodología de integración de datos, a partir de la incorporación de los perfiles de exposición resultantes de la evaluación exterior a la evaluación interior del caso de estudio.

Finalmente, otro hallazgo que se evidenció tras el desarrollo de la presente tesis, es la poca preparación de las viviendas para enfrentar las altas temperaturas, cada vez más inminentes a causa del fenómeno de calentamiento global. Por el contrario, se mantiene el concepto de estructura liviana, desprovista de masa térmica en áticos o niveles superiores, de igual manera se utilizan materiales de cubierta con baja reflectancia, aumentando el riesgo de sobrecalentamiento. Lo anterior, concuerda con lo advertido por Lomas y Porritt (2017) respecto a la problemática que afrontan los edificios situados en climas templados, dado que su foco hasta ahora era la conservación del calor del invierno y no el acondicionamiento en las estaciones cálidas. Por lo cual, se puede concluir para el caso de estudio que,

ante las alzas de temperaturas, es vital el aprovechamiento de las brisas frescas que fluyen en épocas cálidas, donde la torre de viento se presenta como una potencial solución.

7.2 Conclusiones respecto a los objetivos específicos

OE 1: Identificar tipologías de viviendas y sus formas de agrupación que presenten bajas oportunidades de ventilación natural a través de sus fachadas, y que por tanto estén expuestas a riesgo de sobrecalentamiento en áticos o niveles superiores. Seleccionando y caracterizando un caso de estudio a partir de sus condiciones de materialidad y agrupación urbana.

Tras caracterizar el contexto de estudio climático, geográfico y urbanístico, correspondiente a la ciudad de Concepción, se logró reconocer una tipología de vivienda susceptible a riesgos de sobrecalentamiento en verano y que a la vez presentó dificultades para aprovechar la ventilación natural. Dicha tipología correspondió a las viviendas pertenecientes al modelo de condominio, que de acuerdo al análisis de representatividad en SIG, resultaron ser el 79,1% del total de las viviendas recepcionadas en la comuna entre el año 2005 y el 13 de junio del año 2018, correspondiente a la fecha de análisis. En lo que refiere a las características de la tipología de vivienda identificada es resuelta en dos niveles de aproximadamente 47 m² cada uno, más un ático de 27 m² configurado esencialmente por los tijerales que forman la cubierta a dos aguas.

Entre de las condiciones que dificultan el desempeño de la ventilación natural a través de sus ventanas, se identificó la reducida distancia con que se emplaza una vivienda de otra, particularmente entre fachadas laterales de las viviendas; las que para minimizar aún más su distanciamiento generan fachadas prácticamente ciegas, amparadas por la normativa para este tipo de conjunto. Dado lo anterior, es posible establecer que, si bien el modelo de condominio considera distanciamientos estrechos en todas las orientaciones de la vivienda, en el caso que incida el viento en las fachadas frontales, éstas tienen mayor posibilidad de ingreso de aire ya que cuentan con ventanas. Mientras que, si las viviendas presentan sus fachadas laterales expuestas al viento, sus posibilidades de ventilación disminuyen considerablemente debido a la inexistencia de ventanas en ésta orientación. Esto último genera una variable de interés para integrar a evaluaciones de ventilación natural en conjuntos de viviendas, así como también al análisis de pertinencia y desempeño de torres de viento.

Por otra parte, tras analizar los antecedentes de las viviendas correspondientes a la tipología del caso de estudio, se pudo detectar materialidad liviana de baja masa térmica en áticos o niveles superiores, además de materiales de cubierta con baja reflectancia, todo lo cual contribuye a generar altas temperaturas para estos niveles. Estos últimos datos se corroboraron empíricamente a partir de mediciones de temperatura in-situ en el ático de una vivienda perteneciente a la tipología del caso de estudio, la cual registró alzas de temperaturas interiores respecto a las temperaturas exteriores, con diferencias diarias promedio que van desde los 5,4 K a los 7,1 K confirmando el riesgo de sobrecalentamiento para dicho nivel.

Finalmente es posible advertir la falta de criterios vinculados al aprovechamiento de la ventilación natural, tanto en la configuración de los conjuntos como de las viviendas. En vista de lo cual se genera inquietud en torno al modelo de condominio como propuesta inmobiliaria, puesto que se presenta como un formato estándar que repite similares fórmulas para el diseño del conjunto y para el desarrollo de las viviendas. Sin embargo, esta misma condición permite reconocer una oportunidad respecto al potencial de ventilación natural, ya que como todas las viviendas poseen prácticamente la misma altura y a la vez son parte de conjuntos que se extienden en grandes superficies, permiten el flujo casi ininterrumpido del viento sobre sus cubiertas, lo cual puede ser aprovechado por un sistema de captación y evacuación vertical, como las torres de viento.

OE 2: *Analizar el comportamiento de los flujos exteriores incidentes en las fachadas de viviendas que formen parte de conjuntos residenciales, con el fin de establecer perfiles de exposición al viento aplicables al caso de estudio.*

El cumplimiento de este objetivo no solo permitió la comprensión del fenómeno de exposición a los vientos que experimentan las viviendas emplazadas en entornos urbanos de mayor densidad; sino que también se logró obtener los “tipos de exposición” con los coeficientes de presión asociados, necesarios para llevar a cabo la evaluación del desempeño de la ventilación al interior de la vivienda, de acuerdo a la metodología del software de análisis.

En relación al primer punto, se comprobó lo señalado por la literatura respecto a la disminución del potencial de ventilación debido al comportamiento turbulento del flujo en el espacio que se genera entre viviendas densamente emplazadas, las cuales en el caso evaluado en este estudio, presentaron valores de velocidad de viento considerablemente menores en sus fachadas en relación al nivel de sus

cumbreras. Este último dato confirmó el potencial de ventilación para las torres de viento por sobre el nivel de las cubiertas.

Con respecto a los tipos de exposición demandados para la evaluación interior, a raíz de los resultados descritos en el punto anterior, se logró determinar el tipo “protegido” para las fachadas que contienen ventanas, mientras que para el área de captación de la torre de viento se estableció el perfil “expuesto”.

Por otra parte, se pudo poner a prueba el desempeño del software IESVE en el análisis externo de flujos de aire, el cual si bien tiene la limitación de no entregar valores numéricos tabulados para establecer la dirección y velocidad del flujo del aire externo, permitió proporcionar rangos de valores a partir de resultados gráficos que permitieron levantar escenarios de ventilación con mayor rapidez que otros medios de análisis. Lo anterior adquiere relevancia cuando se requiere acompañar el proceso de diseño urbano y arquitectónico, con datos que guíen las decisiones basados en el fenómeno de la ventilación natural.

OE 3: *Establecer directrices que definan la orientación y distanciamientos óptimos de viviendas dentro de un conjunto residencial, en función de las condiciones de captación de los flujos exteriores demandados por una torre de viento.*

Para dar cumplimiento a este objetivo se utilizaron en primera instancia los resultados de la evaluación externa que permitieron obtener directrices del posicionamiento óptimo de la torre de viento, tanto en lo que respecta a su posición en la vivienda que asiste, como en lo referido a las condiciones de proximidad a las edificaciones vecinas. El análisis de flujos exteriores realizado con el software IESVE permitió concluir que la zona de captación de la torre de viento debe estar a una altura de 30 cm sobre la cumbrera de la cubierta. Mientras que la distancia respecto a viviendas aledañas con torres de viento, solo se vio afectada cuando los vientos incidían en la fachada lateral, lo cual se atribuye a la mayor proximidad y a la desviación del flujo que provoca la forma de las cubiertas en este sentido. Debido a lo anterior, se establece que para esta orientación se debe tener la precaución de no tener una torre en la vivienda vecina instalada en la misma posición, o bien repensar la movilidad de la torre dentro de la planta de las viviendas así como la reconsideración de la alineación estricta de las viviendas, en el caso de que el viento de verano tenga una dirección constante.

En lo que refiere a la orientación de la torre de viento, se pudo confirmar su naturaleza multidireccional de captación, esto quiere decir, que independiente a la orientación que tomara la vivienda respecto de

los vientos predominantes, el flujo ingresado por la torre es prácticamente el mismo. A diferencia de lo anterior, para el caso de una vivienda sin torre de viento, pero contando con ambas ventanas abiertas, el cambio de orientación frente a los vientos predominantes, si generó impacto en los flujos ingresados, puesto que la vivienda que recibió el viento de manera frontal a las fachadas con aberturas obtuvo un flujo considerablemente mayor que cuando el viento enfrenta a las fachadas sin aberturas. Esto permitió evidenciar el gran aporte que puede significar la torre de viento para edificaciones con fachadas sin ventanas orientadas a los vientos predominantes.

OE 4: *Evaluar el desempeño de la torre de viento como estrategia de ventilación natural para el control de las temperaturas interiores del ático.*

En primera instancia, tras analizar los resultados de las evaluaciones interiores desarrolladas con el software IESVE, para el caso base, se pudo constatar la efectiva alza de las temperaturas interiores que experimentaron los áticos de las viviendas durante el verano; sobrepasando el límite superior del rango de confort establecido para el día de análisis, tanto en las variables cuyas ventanas permanecieron cerradas, como en algunos de los casos que consideraban aberturas de ventanas.

El análisis permite comprobar que la incorporación de una torre de viento en el ático aporta a la disminución de temperaturas operativas de los recintos que se encuentran bajo su área de influencia; alcanzando su mejor desempeño en los áticos sin subdivisiones interiores, particularmente en los casos en que las ventanas permanecían cerradas en ausencia de moradores, donde se llegó a diferenciales de temperatura de 2,51 K entre el caso base y el mismo caso con la torre de viento incorporada.

Por otro lado, se evidenció que para el caso de los áticos que contaban con subdivisiones interiores, la torre de viento obtuvo un impacto significativo solo en los recintos que se encontraban bajo su asistencia directa, como es el caso del estar. Mientras que los recintos contiguos a éste último, si bien, consiguieron disminuir sus temperaturas gracias a la abertura de puertas, no lograron inscribirse dentro del rango de confort, situación que sólo se logró en complemento con a la abertura de al menos una ventana.

Respecto a la opción de contar con ventilación cruzada por medio de la abertura constante de ambas ventanas, incluso en ausencia de moradores, el aporte de la torre de viento disminuyó considerablemente, particularmente en las variantes que se presentaban fachadas y ventanas a favor del viento, lo cual permite concluir que para dicha condición la torre de viento podría no ser justificada.

Finalmente se concluye la pertinencia de la torre de viento como estrategia de ventilación segura tanto diurna como nocturna, en respuesta a las variables de uso que consideran el cierre de ventanas por motivos de seguridad.

OE 5: *Establecer parámetros de diseño para los configurantes del espacio ático y su relación con la torre de viento, en función del control de las temperaturas interiores en temporadas cálidas.*

Luego de realizar el análisis del comportamiento de las temperaturas operativas en las variantes de diseño y uso propuestas, fue posible establecer al ático sin compartimientos (planta libre) como la configuración más eficiente, debiendo tener en cuenta el correcto dimensionamiento de la torre de viento en función al volumen de aire del recinto a servir.

En el caso de la variante que considera la subdivisión del ático en un dormitorio y un estar, se logró establecer que dado que la torre de viento tiene mayor influencia en las temperaturas del recinto al que asiste directamente, es recomendable para una distribución óptima del ático, dejar el recinto que no está asistido por la torre (dormitorio) en el lado que cuente con la ventana con la mejor orientación a los vientos predominantes. Además, se debe mantener la puerta abierta del tabique divisorio, para extender la influencia de la torre en el caso de que las ventanas estén cerradas o bien potenciar el flujo de aire en el caso de que las ventanas estén abiertas.

Con respecto a la división del ático en dos dormitorios y un pequeño estar, se pudo constatar la alta influencia de la torre de viento sobre el recinto directamente asistido, en este caso el estar. Mientras tanto que en los dormitorios se verificó su baja influencia a pesar de mantener las puertas abiertas. Lo cual permite concluir que, frente a esta configuración del espacio, la torre de viento podría no justificarse, dado que el estar se limita a un espacio de distribución y no de permanencia como el caso de los dormitorios, los cuales quedarían acondicionados principalmente por la abertura de ventanas.

Finalmente, en relación a la posición de la torre de viento en el ático, se pudo comprobar lo recomendado por la literatura, respecto a ubicarla lo más al centro posible, lo cual entregó buenos resultados en término de mejorar la distribución de los flujos de aire. Por otra parte cobra valor, para el caso de viviendas de más de un nivel, el posicionar la torre lo más próxima a la ubicación del espacio de circulación vertical (escalera), ya que este último actúa como tiraje del calor acumulado en la masa térmica de los primeros niveles, potenciando la ventilación nocturna en conjunto con la torre.

7.3 Futuras líneas de investigación

A partir del desarrollo de la presente tesis emergieron posibilidades de extender la profundización del tema en posteriores etapas, ya sea atendiendo a limitaciones detectadas en ésta fase o bien como continuación de la línea de investigación.

Dentro de los hallazgos que se desprendieron de la presente investigación, figuró el comportamiento de la torre de viento en horas de la noche, la cual producto de la disminución de velocidad de viento a dicho horario, sumado a la liberación del calor almacenado en la masa térmica de los primeros niveles, trajo como consecuencia la reducción del flujo de captación de la torre de viento en relación al flujo de evacuación, transformándose ésta última en una gran chimenea. Sería de gran interés profundizar en este fenómeno y contemplar entradas de aire (celosías) en los niveles inferiores para apoyar el flujo convectivo e intensificar el enfriamiento nocturno, sin atentar con la seguridad demandada por los usuarios.

En lo referido a las variables desarrolladas en la matriz de evaluación aplicada al caso de estudio, se propone ampliar las variantes que guardan relación con la orientación de dicho caso respecto a los vientos predominantes, permitiendo precisar escenarios de exposición en ángulos intermedios a los ya evaluados (perpendiculares y paralelos a la fachada principal) extendiendo el análisis a configuraciones de viviendas no tan regulares.

Por otra parte se torna relevante, dada la temática del sobrecalentamiento, poder desarrollar la matriz de evaluación de casos propuesta en escenarios climáticos futuros, con el fin de conocer el impacto de la torre de viento frente a condiciones de temperaturas globales elevadas.

En otra línea de investigación, sería de gran valor poder precisar las evaluaciones de flujo internas, llevando el análisis a modelaciones en CFD, las cuales permitan obtener el comportamiento de los flujos del aire ingresado a través de la torre de viento, con objeto de conocer la distribución de estos últimos al momento de subdividir el espacio.

Finalmente, al realizar la evaluación del caso de estudio a través de la metodología desarrollada, se propone una fase experimental, que a partir de mediciones de los flujos de aire, tanto exterior como interior, permita respaldar el análisis teórico llevado a cabo mediante la simulaciones.

Índice de figuras

Figura 2.1: Temperatura operativa aceptable a rangos para espacios naturalmente acondicionados. (Fuente: ASHRAE 55 - 2017)	31
Figura 2.2: Descripción de aplicabilidad de las categorías, de acuerdo al tipo de edificio y las expectativas de los ocupantes (fuente: EN 15251 - 2007).	32
Figura 2.3: Descripción de aplicabilidad de las categorías, de acuerdo al tipo de edificio y las expectativas de los ocupantes (fuente: EN 15251 - 2007).	32
Figura 2.4: Patrón de flujo sobre viviendas densamente emplazadas (fuente: Etheridge D. 2012)	36
Figura 2.5: Campaña para mantener ventanas cerradas para evitar robos.....	37
Figura 2.6: Comparación de dos habitaciones ventilados, con un flujo disponible en la parte superior (a) Habitación sin torre de viento (windcatcher); (b) Habitación con torre de viento (windcatcher). (fuente: Liu y Mak, 2007).....	39
Figura 2.7: Captadores de viento en Hyderabad en Pakistán. (fuente: Rudofsky, 1964)	40
Figura 2.8: Torres de viento multidireccionales en la ciudad de Yazd, Irán (Bahadori et al. 2014)	40
Figura 2.9: Elevación y planta de una torre de viento con sus partes principales indicadas. (Fuente: Bahadori et al. 2014).	41
Figura 2.10: Esquema de funcionamiento de una torre de viento tradicional (Fuente: Bahadori, 1985)	42
Figura 2.11: Acabados y ornamentos en las cabezas de torres de viento en un barrio tradicional de Yazd (Fuente: Bahadori et al. 2014)	43
Figura 2.12: Modelo 3D de una torre de viento con canales iguales (fuente: Zarandi, 2009)	44
Figura 2.13: A la izquierda Windcatcher™ instalado en Kings Hill Offices, West Malling, Kent (fuente: www.monodraught.com). A la derecha Windvent instalado en Castle Hill Primary School, Chessington, Londres (Fuente: www.mideng.net)	46
Figura 2.14: : Windcatcher™ cuadrado, de la firma Monodraught. En la imagen de la izquierda se aprecian las celosías exteriores mientras que a la derecha se pueden apreciar los divisores internos que fraccionan el sistema de ingreso y egreso de aire en cuatro cuadrantes.....	47
Figura 2.15: Esquema en corte del funcionamiento de un windctacher (fuente: fuente: www.monodraught.com).	48
Figura 2.16: : Ilustra posiciones que pueden tomar los dampers dentro de la torre. En la izquierda, los dampers están a 45°. A la derecha los dampers a 0°, totalmente cerrados. (fuente: Hughes et al. 2012)	49
Figura 2.17: : A la izquierda, torre de viento tradicional con aberturas verticales. A la derecha torre de viento moderna con aberturas y lamas horizontales (Fuente: Khatami, 2009).	50
Figura 2.18 : En la imagen de la izquierda prueba experimental en el túnel de viento para un torre de viento. A la derecha, la misma torre es evaluada mediante simulación en CFD (fuente: Elmualim, 2006 a).....	51
Figura 2.19: Diagrama de contorno de velocidad en CFD visualizando el comportamiento del flujo al interior de una habitación de prueba. (fuente: Calautit y Hughes, 2014 a)	52
Figura 2.20: Análisis de flujo para una habitación asistida por una torre de viento. A la izquierda, visualización de flujos a partir de análisis CFD. A la derecha prueba de humo en túnel de viento para las mismas condiciones de análisis (fuente: Calautit y Hugh, 2014 b).	53
Figura 2.21: Visualización de contorno del CFD que compara el efecto del espaciado de 3 a 5 m sobre la presión entre torres de viento: (a) disposición paralela, caso 1-3 (b) disposición escalonada, caso 4-6. (Fuente: Calautit et al., 2014)	55
Figura 2.22: Contornos de velocidad calculados para una torre de viento con dampers a 45° (fuente: Hughes et al., 2009).	57

Figura 3.1: Esquema general de la metodología propuesta para la investigación.....	70
Figura 3.3: Esquema matriz evaluación interior, vivienda orientada de forma frontal a los vientos.	72
Figura 3.6: Esquema matriz evaluación interior, vivienda con Windcatcher incorporado, orientada de forma lateral a los vientos.	75
Figura 4.1: A la izquierda, la ubicación de la región del Biobío en el territorio chileno. Al centro, la comuna de Concepción dentro de la región del Biobío. A la derecha, el polígono que configura la comuna de Concepción.....	77
Figura 4.2: Datos climáticos de algunas localidades de Chile. Antecedentes respecto del potencial para refrigerar y ventilar que ofrece el ambiente natural de las localidades y principios de ventilación más recomendados: alto (A); mediano (M) y bajo (B) [Fuente: Geeeduc, 2012].....	78
Figura 4.3: Crecimiento de loteos de viviendas en la zona del valle de Andalién, una de las zonas que ha sufrido mayor expansión en la comuna de Concepción. A la izquierda la situación en el año 2008, mientras que a la derecha se aprecia su estado al 2018. (Fuente Google Earth. Observado el 5 de septiembre del 2018)	80
Figura 4.4: Polígonos seleccionados en la comuna de Concepción, correspondientes a viviendas en condominio o loteo con construcción simultánea, que cumplieran con los parámetros establecidos para el caso de estudio.	84
Figura 4.5: Tipología de viviendas, sector Lomas de San Sebastián, Comuna de Concepción.....	85
Figura 4.6: Condominios lomas San Sebastián, zona de expansión residencial de la comuna de Concepción. (Fuente Google Earth. Observado el 5 de septiembre del 2018)	87
Figura 4.7: Esquema básico de distribución en condominios, utilizado comúnmente. A la izquierda el desarrollo del esquema básico en un predio, mientras que a la derecha se observa la sucesión del esquema formando condominios contiguos.....	88
Figura 4.8: Modelo simplificado de la vivienda considerada como caso de estudio	90
Figura 4.9: Registro de temperaturas interiores del ático, a través de un medidor de estrés térmico HD32.3 WBGT.....	94
Figura 4.10: Medición temperaturas ático, día 25 nov. 2016.....	94
Figura 4.11: Medición temperaturas ático, día 26 nov. 2016	95
Figura 4.12: Medición temperaturas ático, día 27 nov. 2016.....	95
Figura 4.13: Medición temperaturas ático, día 28 nov. 2016	95
Figura 4.14: Medición temperaturas ático, día 29 nov. 2016.....	96
Figura 4.15: Medición temperaturas ático, día 30 nov. 2016	96
Figura 4.16: Medición temperaturas ático, día 1 dic. 2016.....	97
Figura 4.17: Levantamiento gráfico dimensiones del Windcatcher™, Square – Classic 95. Fuente: Catalogo Monodraught Natural ventilation.....	98
Figura 4.18: Windcatcher™ Square – Classic, de la firma Monodraught, con un corte para poder visualizar la configuración de las celosías exteriores y la compartimentación interior.	99
Figura 5.1: Modelación del conjunto de viviendas a través del componente de construcción de modelos de IESVE, ModellIT.....	103
Figura 5.2: Dominio de análisis con las dos orientaciones a evaluar. En la izquierda el conjunto enfrentando con sus fachadas frontales al flujo de viento predominante, mientras que a la derecha el conjunto recibiendo al viento de forma lateral a las fachadas frontales.....	105
Figura 5.3: Vista lateral del conjunto, para viento predominante de forma frontal a fachadas (Cv-A). MicroFlo, IESVE.	108
Figura 5.4: Vista lateral acercada, viento predominante de forma frontal a fachadas. (Cv-A). MicroFlo, IESVE. .	108

Figura 5.5: Vista frontal del conjunto, para flujo de viento predominante de forma lateral a fachadas (Cv-B). MicroFlo, IESVE.....	109
Figura 5.6: Vista frontal acercada, viento predominante de forma lateral a fachadas. (Cv-B). MicroFlo, IESVE...	110
Figura 5.7: Vista lateral del conjunto, para viento predominante de forma frontal a fachadas (caso estudio Windcatcher incorporado). (Cv-AWC). MicroFlo, IESVE.	111
Figura 5.8: Vista lateral acercada, viento predominante de forma frontal a fachadas. (Cv-AWC). MicroFlo, IESVE.	112
Figura 5.9: Vista frontal del conjunto, para flujo de viento predominante de forma lateral a fachadas (caso estudio Windcatcher incorporado). (Cv-BWC). MicroFlo, IESVE.....	113
Figura 5.10: Vista frontal acercada, viento predominante de forma lateral a fachadas. (Cv-BWC). MicroFlo, IESVE.	113
Figura 5.11 : Vista frontal del conjunto, para flujo de viento predominante de forma lateral a fachadas (Windcatcher incorporado a una sola vivienda del conjunto). (Cv-BWC(a)). MicroFlo, IESVE.	114
Figura 5.12: Vista frontal acercada, viento predominante de forma lateral a fachadas. (Cv-BWC(a)). MicroFlo, IESVE	115
Figura 6.1: Modelación de la vivienda (caso de estudio) a través del componente de construcción de modelos de IESVE, ModelIT.	119
Figura 6.2: Catalogo de componentes de ventilación pre-modelados por Monodraught, para ser agregados al modelo de vivienda desarrollado en el ModelIT del software IES.....	129
Figura 6.3: Axonométrica de las ocho zonas que conforman el modelo simplificado del windcatcher.	130
Figura 6.4: Orientación de la vivienda con la fachada frontal en dirección sur poniente, desde donde provienen los vientos frescos en las estaciones cálidas para la ciudad de Concepción.	132
Figura 6.5: Visualización de las flechas y valores de los flujos de aire obtenidos para la variable A1c, mediante el cálculo de MacroFlo.....	132
Figura 6.6: Orientación de la vivienda con la fachada lateral en dirección sur poniente, desde donde provienen los vientos frescos en las estaciones cálidas para la ciudad de Concepción.	133
Figura 6.7: Visualización de las flechas y valores de los flujos de aire obtenidos para la variable B1c, mediante el cálculo de MacroFlo.....	134
Figura 6.8 : Visualización de las flechas y valores de los flujos de aire obtenidos para la variable (AWC1a), mediante el cálculo de MacroFlo. A la derecha se sitúa la vivienda con su fachada frontal enfrentando a los vientos predominantes, mientras que a la izquierda se desglosan los flujos de ingreso y egreso a través del windcatcher.	135
Figura 6.9: Visualización de las flechas y valores de los flujos de aire obtenidos para la variable BWC1a, mediante el cálculo de MacroFlo. A la derecha se sitúa la vivienda con su fachada lateral enfrentando a los vientos predominantes, mientras que a la izquierda se desglosan los flujos de ingreso y egreso a través del Windcatcher.	136
Figura 6.10: Síntesis gráfica del comportamiento de las temperaturas operativas respecto a la banda de confort, por variable.	138
Figura 6.11: Esquema funcionamiento de la matriz comparativa de resultados de las temperaturas operativas respecto a la banda de confort.	139
Figura 6.12: Gráficos de temperaturas operativas (°C) por recinto, en relación al rango de confort térmico establecido, para las variables A1a, AWC1a en la parte superior y B1a, BWC1a en la parte inferior. Día de análisis (17 de enero).....	140

Figura 6.13: Gráficos de temperaturas operativas (°C) por recinto, en referencia al rango de confort térmico establecido, para las variables A1b, AWC1b en la parte superior y B1b, BWC1b en la parte inferior. Día de análisis (17 de enero)..... 142

Figura 6.14: Gráficos de temperaturas operativas (°C) por recinto, en referencia al rango de confort térmico establecido, para las variables A1c, AWC1c en la parte superior y B1c, BWC1c en la parte inferior. Día de análisis (17 de enero)..... 144

Figura 6.15: Gráficos de temperaturas operativas (°C) por recinto, en referencia al rango de confort térmico establecido, para las variables A2a, AWC2a en la parte superior y B2a, BWC2a en la parte inferior. Día de análisis (17 de enero)..... 146

Figura 6.16: Gráficos de las temperaturas operativas (°C) por recinto, en referencia al rango de confort térmico establecido, para las variables A2b, AWC2b, en la parte superior y B2b, BWC2b en la parte inferior. Día de análisis (17 de enero)..... 148

Figura 6.17: Gráficos de las temperaturas operativas (°C) por recinto, en referencia al rango de confort térmico establecido, para las variables A2c, AWC2c en la parte superior y B2c, BWC2c en la parte inferior de la imagen. Día de análisis (17 de enero)..... 150

Figura 6.18: Gráficos de las temperaturas operativas (°C) por recinto, en referencia al rango de confort térmico establecido, para las variables A2d, AWC2d en la parte superior y B2d, BWC2d en la parte inferior. Día de análisis (17 de enero)..... 152

Figura 6.19: Gráficos de las temperaturas operativas (°C) por recinto, en referencia al rango de confort térmico establecido, para las variables A3a, AWC3a en la parte superior y B3a, BWC3a en la parte inferior. Día de análisis (17 de enero)..... 154

Figura 6.20: Gráficos de las temperaturas operativas (°C) por recinto, en referencia al rango de confort térmico establecido, para las variables A3b, AWC3b en la parte superior y B3b, BWC3b en la parte inferior. Día de análisis (17 de enero)..... 157

Figura 6.21: Gráficos de las temperaturas operativas (°C) por recinto, en referencia al rango de confort térmico establecido, para las variables A3c, AWC3c en la parte superior y B3c, BWC3c en la parte inferior. Día de análisis (17 de enero)..... 159

Figura 6.22: Gráficos de las temperaturas operativas (°C) por recinto, en referencia al rango de confort térmico establecido, para las variables A3d, AWC3d en la parte superior y B3d, BWC3d en la parte inferior. Día de análisis (17 de enero)..... 161

Figura 6.23: Cuadro resumen de las temperaturas operativas máximas registradas en el ático, marcando en rojo las temperaturas que superen los 26,9 °C que representa el límite superior del rango de confort establecido. 163

Índice de tablas

Tabla 3.1: Resumen cálculo de temperatura del aire exterior prevaleciente, tomando como escenario climático el día 17 de enero.....	69
Tabla 4.1: Distanciamiento mínimo entre fachadas de viviendas en conjunto, según artículo 4.1.15 O.G.U.C.....	88
Tabla 4.2: Distanciamiento mínimo entre fachadas de viviendas en conjunto, según artículo 4.1.15 O.G.U.C.....	93
Tabla 4.3: : Dimensiones del WindcatcherTM, Square – Classic 95. (Elaboración propia en base a catalogo Monodraught Natural ventilation).....	99
Tabla 6.1: Visualización de los datos climáticos del archivo CHL_Concepcion.856820_IWEC.epw a través del software Climate Consultant.	121
Tabla 6.2: Valores promedio de variables climatológicas, para los meses cálidos en la ciudad de Concepción, según la NCh 1079 Of 2008.	122
Tabla 6.3: Condiciones para el día seleccionado como escenario climático (17 de enero), establecidas a partir del archivo climático CHL_Concepcion.856820_IWEC.epw.....	123
Tabla 6.4: Tabla resumen soluciones constructivas con sus espesores totales y valores U, ingresados en Apache.	124
Tabla 6.5: Variables de aberturas de ventanas en relación a los periodos de ausencia de los ocupantes.	126
Tabla 6.6: Cuadro de aportes energéticos por efecto de ocupación.	127
Tabla 6.7: Cuadro de aportes energéticos por efecto de iluminación.....	128
Tabla 6.8:Cuadro de aportes energéticos por efecto de Artefactos y equipos de uso doméstico.....	128
Tabla 6.9: Cuadro resumen resultados de impacto en el desempeño de la ventilación natural, tras el cambio de orientación de la vivienda. En la parte superior las variables A1c y B1c, con los flujos de aire ingresados por ventanas, mientras que en la parte inferior las variables AWC1a y BWC1a, con los flujos de aire ingresados a través del Windcatcher.....	137
Tabla 6.10: Valores de temperatura operativa máxima (°C) de cada recinto, en relación a la temperatura límite del rango de confort térmico (°C). Para las variables de análisis A1a, AWC1a, B1a, BWC1a.	140
Tabla 6.11: Valores de temperatura operativa máxima (°C) de cada recinto, respecto a la temperatura límite del rango de confort térmico (°C). Para las variables de análisis A1b, AWC1b, B1b, BWC1b.	142
Tabla 6.12: Valores de temperatura operativa máxima (°C) de cada recinto, respecto la temperatura límite del rango de confort térmico (°C). Para las variables de análisis A1c, AWC1c, B1c, BWC1c.....	144
Tabla 6.13: Valores de temperatura operativa máxima (°C) de cada recinto, respecto a la temperatura límite del rango de confort térmico (°C). Para las variables de análisis A2a, AWC2a, B2a, BWC2a.....	146
Tabla 6.14: Valores de la temperatura operativa máxima (°C) de cada recinto, respecto la temperatura límite del rango de confort térmico (°C). Para las variables de análisis A2b, AWC2b, B2b, BWC2b.	148
Tabla 6.15: Valores de la temperatura operativa máxima (°C) de cada recinto, respecto la temperatura límite del rango de confort térmico (°C). Para las variables de análisis A2c, AWC2c, B2c, BWC2c.....	150
Tabla 6.16: Valores de la temperatura operativa máxima (°C) de cada recinto, respecto la temperatura límite del rango de confort térmico (°C). Para las variables de análisis A2d, AWC2d, B2b, BWC2d.	152
Tabla 6.17: Valores de la temperatura operativa máxima (°C) de cada recinto, respecto la temperatura límite del rango de confort térmico (°C). Para las variables de análisis A3a, AWC3a, B3a, BWC3a.....	154
Tabla 6.18: Valores de la temperatura operativa máxima (°C) de cada recinto, respecto la temperatura límite del rango de confort térmico (°C). Para las variables de análisis A3b, AWC3b, B3b, BWC3b.	157
Tabla 6.19: Valores de la temperatura operativa máxima (°C) de cada recinto, respecto la temperatura límite del rango de confort térmico (°C). Para las variables de análisis A3c, AWC3c, B3c, BWC3c.....	159

Tabla 6.20: Valores de la temperatura operativa máxima (°C) de cada recinto, respecto la temperatura límite del rango de confort térmico (°C). Para las variables de análisis A3d, AWC3d, B3d, BWC3d. 161

Bibliografía

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

AKBARI, H., MENON, S. y ROSENFELD, A., 2009. Global cooling: Increasing world-wide urban albedos to offset CO 2. *Climatic Change*, vol. 94, no. 3–4, pp. 275–286. ISSN 01650009. DOI 10.1007/s10584-008-9515-9.

ALSHITAWI, M., AWBI, H. y MAHYUDDIN, N. 2009. The effect of outdoor conditions and air change rate on particulate matter (PM10) concentration in a classroom equipped with a windcatcher. *Room vent Proceedings of the 11th International Roomvent Conference: Roomvent 2009, Busan, Korea, May 24 - 27, 2009*. <http://repository.um.edu.my/6660/1/roomvent%5Cnpm10.pdf>.

ARIAS, N. y BOBADILLA, A., 2017. Evaluación experimental y análisis de la mejora con aislamiento para el caso del puente térmico en el frente de forjado. *Informes de la Construcción*, vol. 69, no. 546. ISSN 19883234. DOI 10.3989/ic.15.151.

ARYAN, A., EHSAN, Z., AMIN, S. y MASOUD, K., 2010. Wind Catchers: Remarkable Example of Iranian Sustainable Architecture. *Journal of Sustainable Development*, vol. 3, no. 2, pp. 89–97. ISSN 1913-9063. DOI 10.5539/jsd.v3n2p89.

ASHRAE, 2017. ANSI/ASHRAE Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, American Society of Heating Refrigerating and Air- Conditioning Engineers.

ASHRAE. 2017. ASHRAE Hand book Fundamentals. Atlanta, American Society of Heating Refrigerating and Air- Conditioning Engineers.

ATTIA, S. y CARLUCCI, S., 2015. Impact of different thermal comfort models on zero energy residential buildings in hot climate. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 102, pp. 117–128. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2015.05.017. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.017>

AULICIEMS, A. 1981. Towards a Psycho-Physiological Model. *Int J Biometeorol*. Vol. 25, no. 2. pp 109-122. <https://doi.org/10.1007/BF02184458>

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.

BAERISWYL S. Crecimiento urbano del Gran Concepción, patrones y tendencias de una metropolización. En: HIDALGO R., DE MATTOS C., ARENAS F. (Eds). *Chile: del país urbano al país metropolitano*. 1a ed. Chile, 2009. pp. 241-255.

BAHADORI, M.N., 1985. An improved design of wind towers for natural ventilation and passive cooling. *Solar Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 119–129. ISSN 0038092X. DOI 10.1016/0038-092X (85)90002-7.

BAHADORI, Mehdi. DEGHANI-SANJI, Alireza, SAYIGH Ali. *Wind Towers – Architecture, Climate and Sustainability*. Suiza, Springer, 2014. 212p.

BORGESON, S., BRAGER, G. 2008. Occupant control of window: accounting for human behavior in building simulation. UC Berkeley: Center for the Built Environment. [en línea]. Disponible en: <https://escholarship.org/uc/item/5gx2n1zz>.

BRE, F., y GIMENEZ, J.M. 2019. Hacia una herramienta basada en la nube para simular la ventilación natural en edificios : predicción de los coeficientes de presión. Actas del VI congreso latinoamericano de simulación de edificios IBPSA LATAM 2019. Octubre 2019. Mendoza, Argentina. pp 89-101

BROTAS, L. y NICOL, F., 2017. Estimating overheating in European dwellings. *Architectural Science Review* [en línea], vol. 60, no. 3, pp. 180–191. ISSN 17589622. DOI 10.1080/00038628.2017.1300762. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/00038628.2017.1300762>.

BROTAS, L., JOHN, S. y FACULTY, C., 2015. Adaptive Comfort Model and Overheating in Europe Re-Thinking the Future. *Plea 2015 Bologna: Architecture in (R)evolution*, no. September 2015.

BUSTAMANTE, W. Y ROZAS, Y. 2009. Guía de diseño para la Eficiencia energética en la Vivienda Social. Serie II Tecnología de la Construcción. Santiago: Monografía y Ensayos Pontificia Universidad Católica de Chile.

BUSTAMANTE, W., DE HERDE, A., ENCINAS, F., 2010. Análisis de comportamiento térmico de edificios de oficinas en comunas de la región Metropolitana, Chile. *Revista de la Construcción*, vol. 10, no. 1, pp. 64-77. ISSN 0717–7925.

CACIOLO, M., STABAT, P. y MARCHIO, D., 2011. Full scale experimental study of single-sided ventilation: Analysis of stack and wind effects. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 43, no. 7, pp. 1765–1773. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2011.03.019. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.019>.

CACIOLO, M., STABAT, P. y MARCHIO, D., 2012. Numerical simulation of single-sided ventilation using RANS and LES and comparison with full-scale experiments. *Building and Environment* [en línea], vol. 50, pp. 202–213. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2011.10.017. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.10.017>.

CALAUTIT, J.K. y HUGHES, B.R. 2014 (a). Measurement and prediction of the indoor airflow in a room ventilated with a commercial wind tower. *Energy and Buildings* [en línea]. Vol. 84, pp. 367-377. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2014.08.015. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.015>.

CALAUTIT, J.K. y HUGHES, B.R. 2014 (b). Wind tunnel and CFD study of the natural ventilation performance of a commercial multi-directional wind tower. *Building and Environment* [en línea]. Vol. 80, pp. 71-83. [Consulta: 31 diciembre 2014]. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2014.05.022. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132314001723>.

CALAUTIT, J.K., O'CONNOR, D. y HUGHES, B.R., 2014. Determining the optimum spacing and arrangement for commercial wind towers for ventilation performance., *Building and Environment* [en línea], vol. 82, pp. 274–287. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2014.08.024. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.024>.

CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS. *Applications Manual AM10*. The Chartered Institution of Building Services Engineers, London, UK. 2005. 70p.

CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS. *CIBSE TM52*. 2013. The limits of thermal comfort: avoiding overheating in European buildings. *CIBSE Technical Memorandum No 52*. The Chartered Institution of Building Services Engineers, London, UK. 2013.

CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS. *Environmental desing CIBSE Guide A*. 7th ed. The Chartered Institution of Building Services Engineers, London, UK. 2006. 350p. ISBN 1903287669 9781903287668

CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS. *Environmental desing CIBSE Guide A*. 8th ed. The Chartered Institution of Building Services Engineers, London, UK. 2015. 402p. ISBN 9781906846541.

CHENG, J., QI, D., KATAL, A., WANG, L. (Leon) y STATHOPOULOS, T., 2018. Evaluating wind-driven natural ventilation potential for early building design. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* [en línea], vol. 182, no. April, pp. 160–169. ISSN 01676105. DOI 10.1016/j.jweia.2018.09.017. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.09.017>.

DE DEAR R. 2004, *Thermal Comfort in Practice*. *Indoor Air Journal*. Vol 14. Supplement 7, pp 32-39.

DE DEAR, R. y BRAGER, G. 1998. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Transactions*, Vol 104 (1), pp. 145-167 En: a223. ISSN 00012505.

DE DEAR, R. y BRAGER, G. 2002. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*. Vol. 34, no. 6, pp. 549-561. ISSN 03787788. DOI 10.1016/S0378-7788(02)00005-1.

DE DEAR, R. y CANDIDO, C., 2012. An adaptive thermal comfort policy for a geographically dispersed property portfolio; deciding when and where to air-condition in a warm climate zone. *Proceedings of 7th Windsor Conference: The Changing Context of Comfort in an Unpredictable World*. S.l.: s.n.,

DEGHANI-SANIJ, A., SOLTANI, M. y RAAHEMIFAR, K., 2015. A new design of wind tower for passive ventilation in buildings to reduce energy consumption in windy regions. *Renewable and Sustainable*

Energy Reviews [en línea], vol. 42, pp. 182–195. ISSN 18790690. DOI 10.1016/j.rser.2014.10.018. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.018>.

DEHNAVI, M., GHADIRI, M.H., MOHAMMADI, H. y GHADIRI, H., 2012. Study of Wind Catchers with square plan: Influence of physical parameters. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, vol. 2, no. 1, pp. 559–564.

ELIZALDE, T. y MUMOVIC, D., 2008. Simulated performance of windcatchers in an urban environment. *PLEA 2008 - Towards Zero Energy Building: 25th PLEA International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Conference Proceedings*, no. October, pp. 24–26.

ELMUALIM, A.A. 2006 (b). Verification of design calculations of a wind catcher/tower natural ventilation system with performance testing in a real building. *International Journal of Ventilation*. Vol. 4, no. 4, pp. 393-404. ISSN 14733315. DOI 10.1080/14733315.2005.11683717.

ELMUALIM, A.A. y AWBI, H.B. 2002. Wind Tunnel and CFD Investigation of the Performance of «Windcatcher» Ventilation Systems., *International Journal of Ventilation*. Vol. 1, no. 1, pp. 53-64. ISSN 1473-3315. DOI 10.1080/14733315.2002.11683622.

ELMUALIM, A.A., 2006 (a). Dynamic modelling of a wind catcher/tower turret for natural ventilation., *Building Services Engineering Research and Technology*, vol. 27, no. 3, pp. 165–182. ISSN 01436244. DOI 10.1191/0143624406bse159oa.

ELMUALIM, A.A., 2006. Effect of damper and heat source on wind catcher natural ventilation performance. *Energy and Buildings*, vol. 38, no. 8, pp. 939–948. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2005.11.004.

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

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. 2007. *Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics; EN 15251:2007*; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium.

EXIZIDOU, P., CHRISTOFOROU, E. y FOKAIDES, P.A., 2017. Numerical assessment of night ventilation impact on the thermal comfort of vernacular buildings. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, vol. 2, no. 1, pp. 1–11. ISSN 2365-3159. DOI 10.1007/s41024-016-0021-6.

FANGER, P. y TOFTUM, J. 2002. Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates. *Energy and Buildings*. Vol. 34, no. 6, pp. 533-536. ISSN 03787788. DOI 10.1016/S0378-7788(02)00003-8.

FANGER, P.O. *Thermal Comfort. Analysis and Applications in Enviromental Engineering*. Copenhagen, Denmark Danish Technical Press, 1970. 244 pp.

FERRARI, S. y ZANOTTO, V. 2012. Adaptive comfort: Analysis and application of the main indices. *Building and Environment* [en línea]. Vol. 49, no. 1, pp. 25-32. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2011.08.022. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.022>.

FORGIARINI, R., GIRALDO, N. y LAMBERTS, R., 2015. A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 105, pp. 178–205. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2015.07.047. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047>.

GHADIRI, M.H., IBRAHIM, N.L.N. y MOHAMED, M.F., 2013. Performance evaluation of four-sided square wind catchers with different geometries by numerical method. *Engineering Journal*, vol. 17, no. 4, pp. 9–17. ISSN 01258281. DOI 10.4186/ej.2013.17.4.9.

HAHN, L., MCCASKILL, J., MILLER, W., DESJARLAIS, A.O., JACOBS, J. y YOUNGQUIST, A., 2006. Whole House Thermal Performance of Asphalt Shingles Exploiting Special Infrared Reflective Pigments. *H&H - Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates*.

HE, B.J., DING, L. y PRASAD, D. 2019. 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]. Vol. 47, no. January, pp. 101472. ISSN 22106707. DOI 10.1016/j.scs.2019.101472. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101472>

HEISELBERG, P. y PERINO, M., 2010. Short-term airing by natural ventilation - implication on IAQ and thermal comfort. *Indoor Air*, vol. 20, no. 2, pp. 126–140. ISSN 09056947. DOI 10.1111/j.1600-0668.2009.00630.x.

HIDALGO, R., 2004. De los pequeños condominios a la ciudad vallada: Las urbanizaciones cerradas y la nueva geografía social en Santiago de Chile (1990-2000). *Eure*, vol. 30, no. 91, pp. 29–52. ISSN 02507161. DOI 10.4067/s0250-71612004009100003.

HIDALGO, R., BORSODORF, A., ZUNINO, H. y ALVAREZ, L., 2016. Tipologías de expansión metropolitana en Santiago de Chile: precario... <http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-270/sn-270-113.htm>. , no. 2004, pp. 1–12.

HIDALGO, R., SALAZAR, A., ÁLVAREZ, L. 2003. Los condominios y urbanizaciones cerradas como nuevo modelo de construcción del espacio residencial en Santiago de Chile (1992-2000). *Scripta Nova: Revista electrónica de geografía y ciencias sociales* [en línea], vol. 7, no. 146 (126). ISSN 1138-9788

HOSSEINI, S., SHOKRY, E., AHMADIAN HOSSEINI, A., AHMADI, G. y CALAUTIT, J., 2016. 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], vol. 35, pp. 7–24. ISSN 23524669. DOI 10.1016/j.esd.2016.09.005. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2016.09.005>.

HUGHES B. y GHANI S. 2011. A numerical investigation into the feasibility of a passive-assisted natural ventilation stack device. *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 30, no. 4, pp. 193–211. ISSN 14786451. DOI 10.1080/1478646X.2010.503275.

HUGHES, B., CALAUTIT, J. y GHANI, S., 2012. The development of commercial wind towers for natural ventilation: A review. *Applied Energy* [en línea], vol. 92, pp. 606–627. ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2011.11.066. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.066>.

HUGHES, B.R. y ABDUL GHANI, S.A.A. 2009. A numerical investigation into the effect of windvent dampers on operating conditions. *Building and Environment*. Vol. 44, no. 2, pp. 237-248. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2008.02.012.

HUGHES, B.R. y GHANI, S.A.A.A. 2010. A numerical investigation into the effect of Windvent louvre external angle on passive stack ventilation performance. *Building and Environment* [en línea]. Vol. 45, no. 4, pp. 1025-1036. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2009.10.010. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.10.010>.

HUGHES, B.R. y MAK, C.M., 2011. A study of wind and buoyancy driven flows through commercial wind towers. En: *A132, Energy and Buildings* [en línea], vol. 43, no. 7, pp. 1784–1791. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2011.03.022. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.022>.

HUMPHREYS, M. 1978. Outdoor temperatures and comfort indoors. *Batiment International, Building Research and Practice* [en línea]. Vol. 6, no. 2, pp. 92. ISSN 0182-3329. DOI 10.1080/09613217808550656. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/09613217808550656>.

HUMPHREYS, M. y NICOL, J. 1998. Understanding the adaptive approach to thermal comfort., *ASHRAE Transactions*. Vol. 104, no. Pt 1B, pp. 991-1004. ISSN 00012505.

HUMPHREYS, M., RIJAL, H. y NICOL, J. 2013. Updating the adaptive relation between climate and comfort indoors; new insights and an extended database. *Building and Environment* [en línea]. Vol. 63, pp. 40-55. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2013.01.024. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.01.024>.

IES VIRTUAL ENVIRONMENT. 2015 (a). ModelIT: Model builder User Guide [en línea]< https://www.iesve.com/support/ve/knowledgebase_faq [consulta: 17 junio 2017]

IES VIRTUAL ENVIRONMENT. 2015 (b). MacroFlo Calculation Methods: IES Virtual Enviroment [en línea]< <https://www.iesve.com/downloads/help/Thermal/Reference/MacroFloCalculationMethods.pdf> [consulta: 18 octubre 2017]

IES VIRTUAL ENVIRONMENT. 2015 (c). Apache-Tables User Guide: IES Virtual Enviroment [en línea]< https://www.iesve.com/support/ve/knowledgebase_faq [consulta: 12 diciembre 2017]

IES VIRTUAL ENVIRONMENT. 2015 (d). MacroFlo User Guide: IES Virtual Enviroment [en línea]< <https://www.iesve.com/downloads/help/VE2015/Thermal/MacroFlo.pdf> [consulta: 18 octubre 2017]

INSITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA. Censo 2002. Santiago, Gobierno de Chile, 2003.

INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN, INN. Arquitectura y Construcción - Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico. NCh 1079. Of 2008. Santiago, Chile, 2008.

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.

ISO. 2005. Ergonomics of the Thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. ISO 7730:2005. Geneva: International Organization for Standardization.

Ji, L., TAN, H., KATO, S., BU, Z. y TAKAHASHI, T., 2011. Wind tunnel investigation on influence of fluctuating wind direction on cross natural ventilation. *Building and Environment* [en línea], vol. 46, no. 12, pp. 2490–2499. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2011.06.006. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.06.006>. En:

Ji, Z., SU, Y. Y KHAN, N., 2012. Performance Evaluation and Energy Saving Potential of Windcatcher Natural Ventilation Systems in China. *International Journal of Architecture, Engineering and Construction*. 1. 84-95. 10.7492/IJAEC.2012.010.

JOMEHZADEH, F., NEJAT, P., CALAUTIT, J.K., YUSOF, M.B.M., ZAKI, S.A., HUGHES, B.R. y YAZID, M.N.A.W.M., 2017. A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, Part 1: Indoor air quality and thermal comfort assessment. 2017. S.l.: s.n.

JONES, B., KIRBY, R., KOLOKOTRONI, M., AND PAYNE, T., 2008. Air quality measured in a classroom served by roof mounted natural ventilation windcatchers. *Proceedings of the 2008 Conference for the Engineering Doctorate in Environmental Technology*, Brunel University, West London, UK.

JONES, B.M. y KIRBY, R., 2009. Quantifying the performance of a top-down natural ventilation WindcatcherTM., *Building and Environment* [en línea], vol. 44, no. 9, pp. 1925–1934. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2009.01.004. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.01.004>.

KHAN, N., SU, Y. y RIFFAT, S., 2008. A review on wind driven ventilation techniques. *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 8, pp. 1586–1604. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2008.02.015.

KHATAMI, N. The wind-catcher: a traditional solution for a modern problem. Tesis Master University of Glamorgan, Gales, Reino Unido 2009.

LAN, L. y LIAN, Z. 2016. Ten questions concerning thermal environment and sleep quality. *Building and Environment* [en línea]. Vol. 99, pp. 252-259. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2016.01.017. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.01.017>.

LAN, L., TSUZUKI, K., LIU, Y.F. y LIAN, Z.W. 2017. Thermal environment and sleep quality: A review., *Energy and Buildings* [en línea]. Vol. 149, pp. 101-113. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2017.05.043. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.043>.

LIU, L. y MAK, C.M., 2007. The assessment of the performance of a windcatcher system using computational fluid dynamics. *Building and Environment*, vol. 42, no. 3, pp. 1135-1141. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2005.12.015.

LOMAS, K. y PORRITT, S., 2017. Overheating in buildings: lessons from research. *Building Research and Information*, vol. 45, no. 1–2, pp. 1–18. ISSN 14664321. DOI 10.1080/09613218.2017.1256136.

MANESHI, M.M., REZAEI-BAZKIAEI, A., WEBER, A.S. y DARGUSH, G.F. 2012. A Numerical Investigation of Impact of Architectural and Climatic Parameters of Windcatcher Systems on Induced Ventilation., *Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE)*, November 9-15, 2012, Houston, Texas, USA. pp. 1-15. DOI 10.1115/IMECE2012-87139.

MAVROGIANNI, A. y MUMOVIC, D., 2010. On the use of windcatchers in schools: Climate change, occupancy patterns, and adaptation strategies. *Indoor and Built Environment*, vol. 19, no. 3, pp. 340–354. ISSN 1420326X. DOI 10.1177/1420326X09341507.

MAVROGIANNI, A., DAVIES, M., TAYLOR, J., CHALABI, Z., BIDDULPH, P., OIKONOMOU, E., DAS, P. y JONES, B., 2014. The impact of occupancy patterns, occupant-controlled ventilation and shading on indoor overheating risk in domestic environments. *Building and Environment* [en línea], vol. 78, pp. 183–198. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2014.04.008. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.008>.

MAVROGIANNI, A., WILKINSON, P., DAVIES, M., BIDDULPH, P. y OIKONOMOU, E., 2012. Building characteristics as determinants of propensity to high indoor summer temperatures in London dwellings. *Building and Environment* [en línea], vol. 55, pp. 117–130. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2011.12.003. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.12.003>.

MC CARTNEY K.J AND NICOL J.F. (2002) Developing an Adaptive Control Algorithm for Europe: Results of the SCATs Project. *Energy and Buildings* 34(6) pp 623-635

MEEHL, G.A. y TEBALDI, C., 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, vol. 305, no. 5686, pp. 994–997. ISSN 00368075. DOI 10.1126/science.1098704.

MIDTHERM ENGINEERING LIMITEC. Galery. [en línea] <<http://www.mideng.net/product-range/natural-ventilation-systems/gallery/View>> [consulta: 12 agosto 2019].

MONODRAUGHT. Windcatcher Natural ventilation systems [en línea] <<https://www.monodraught.com/products/natural-ventilation/windcatcher-classic>> [consulta: 23 mayo 2018]

MONODRAUGHT. Windcatcher Natural ventilation systems [en línea]<
<https://www.monodraught.com/products/natural-ventilation/windcatcher-classic>> [consulta: 23 mayo 2018]

MURPHY, J., et al. (2009). UKCP09 climate change projections. Exeter

NICOL, F. y HUMPHREYS, M. 2018. Room temperature sleep. En: Windsor Conference, Rethinking comfort. (23^a, 2018, Windsor, Reino Unido) Rethinking comfort – Proceedings. 2018. 6p.

NICOL, F. y HUMPHREYS, M., 2010. Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251. Building and Environment [en línea], vol. 45, no. 1, pp. 11–17. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2008.12.013. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.12.013>.

NICOL, F., HUMPHREYS, M. y ROAF, S. Adaptive thermal comfort: principles and practice, Oxford, U.K. Routledge. 2012. 208 pp.

NICOL, J. y HUMPHREYS M. 1973. Thermal comfort as part of a self-regulating system. Building Research and Practice, vol 1, Issue 3. pp 174-179, DOI: 10.1080/09613217308550237

NICOL, J. y HUMPHREYS, M. 2002. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. Energy and Buildings. Vol. 34, no. 6, pp. 563-572. ISSN 03787788. DOI 10.1016/S0378-7788(02)00006-3.

NICOL, J.F., WILSON, M., NICOL, J.F. y WILSON, M., 2011. A critique of European Standard EN 15251: strengths, weaknesses and lessons for future standards INFORMATION PAPER A critique of European Standard EN 15251: strengths, weaknesses and lessons for future standards. En: vol. 3218. DOI 10.1080/09613218.2011.556824.

OKAMOTO-MIZUNO, K. y MIZUNO, K. 2014. Effects of thermal environment on human sleep and thermoregulation. Japanese Journal of Biometeorology. Vol. 50, no. 4, pp. 125-134. ISSN 1347-7617. DOI 10.11227/seikisho.50.125.

OKE, T., 1987. Boundary layer climates. 2da. Ed. Routledge. ISBN 0-203-40721-0

OKE, T., MILLS, G., CHRISTEN, A., VOOGT, J. 2017. Urban Climates. Cambridge University Press. 546p. ISBN 9780521849500.

OROPEZA-PEREZ, I. y ØSTERGAARD, P.A., 2014. Potential of natural ventilation in temperate countries - A case study of Denmark. Applied Energy [en línea], vol. 114, pp. 520–530. ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2013.10.008. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.008>.

PALME, M., CARRASCO, C., ÁNGEL GÁLVEZ, M. y INOSTROZA, L., 2017. 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. S.l.: s.n., DOI 10.1088/1757-899X/245/7/072046.

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

PAN, L., LIAN, Z. y LAN, L. 2012. Investigation of sleep quality under different temperatures based on subjective and physiological measurements. *HVAC and R Research*. Vol. 18, no. 5, pp. 1030-1043. ISSN 10789669. DOI 10.1080/10789669.2012.667037.

PARKER, D.S., SONNE, J.K. y SHERWIN, J.R., 1998. Comparative Evaluation of the Impact of Roofing Systems on Residential Cooling Energy Demand in Florida Research Description. *Solar Energy*, pp. 219–234.

PEETERS, L., DEAR, R. De, HENSEN, J. y D'HAESELEER, W., 2009. Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation. *Applied Energy* [en línea], vol. 86, no. 5, pp. 772–780. ISSN 03062619. DOI 10.1016/j.apenergy.2008.07.011. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.07.011>.

PÉREZ, L. y SALINAS E., 2007. Crecimiento urbano y globalización: transformaciones del Área Metropolitana de Concepción, Chile, 1992-2002. *Scripta Nova*, vol. 11, no. July, pp. 1–33. ISSN 11389788. DOI 10.1344/sn2007.11.1324.

PÉREZ, L., GONZÁLEZ, C. y SALINAS, E., 2008. Nuevas formas y nuevos contenidos. Nueve paisajes residenciales en el Área Metropolitana de Concepción (AMC), Chile. X Coloquio Internacional de Geocrítica - Diez años de cambios en el mundo, en la geografía y en las ciencias sociales, 1999-2008, Universidad de Barcelona, Barcelona, España. [en línea], no. May 2008. Disponible en: <http://www.ub.es/geocrit/-xcol/385.htm%5Cninternal-pdf:/Perez,2008.pdf>.

PÉREZ-FARGALLO, A., RUBIO-BELLIDO, C. y GALLEGO-MAYA, I., 2018. Influence of adaptive comfort models in execution cost improvements for housing thermal environment in Concepción, Chile. *Sustainability (Switzerland)*, vol. 10, no. 7. ISSN 20711050. DOI 10.3390/su10072368.

POMFRET, L. y HASHEMI, A., 2017. Thermal Comfort in Zero Energy Buildings. *Energy Procedia* [en línea], vol. 134, pp. 825–834. ISSN 18766102. DOI 10.1016/j.egypro.2017.09.536. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.536>.

RIJAL, H.B., TUOHY, P., HUMPHREYS, M.A., NICOL, J.F., SAMUEL, A. y CLARKE, J., 2007. Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings. *Energy and Buildings*, vol. 39, no. 7, pp. 823–836. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2007.02.003.

ROAF, S., 1990. The traditional technology trap: stereotypes of Middle Eastern traditional building types and technologies. *Dialog*, vol. 25, no. October, pp. 26–33.

ROAF, S., 2005. Air-conditioning avoidance: lessons from the windcatchers of Iran. International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment". S.l.: s.n., pp. 1053–1057.

ROSADO, P.J., FAULKNER, D., SULLIVAN, D.P. y LEVINSON, R., 2014. Measured temperature reductions and energy savings from a cool tile roof on a central California home. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 80, pp. 57–71. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2014.04.024. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.024>.

RUDOLFSKY, B. 1964. *Architecture without architects: An Introduction to Non-Pedigreed Architecture*. New York, United State of America, The Museum of Modern Art. 156p.

SAADATIAN, O., HAW, L.C., SOPIAN, K. y SULAIMAN, M.Y., 2012. Review of windcatcher technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], vol. 16, no. 3, pp. 1477–1495. ISSN 13640321. DOI 10.1016/j.rser.2011.11.037. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.037>.

SAHEBZADEH, S., HEIDARI, A., KAMELNIA, H. y BAGHBANI, A., 2017. Sustainability features of Iran's vernacular architecture: A comparative study between the architecture of hot-arid and hot-arid-windy regions. *Sustainability (Switzerland)*, vol. 9, no. 5. ISSN 20711050. DOI 10.3390/su9050749.

SÁNCHEZ, D., SÁNCHEZ-GUEVARA, C. y RUBIO, C., 2016. El enfoque adaptativo del confort térmico en Sevilla = The adaptive approach to thermal comfort in Seville. *Anales de Edificación*, vol. 2, no. 1, pp. 38. DOI 10.20868/ade.2016.3197.

SANTAMOURIS, M., 2014. Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy* [en línea], vol. 103, pp. 682–703. ISSN 0038092X. DOI 10.1016/j.solener.2012.07.003. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>.

SANTAMOURIS, M., 2014. On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 82, pp. 100–113. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2014.07.022. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.022>.

SANTAMOURIS, M., SYNNEFA, A. y KARLESSI, T., 2011. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy* [en línea], vol. 85, no. 12, pp. 3085–3102. ISSN 0038092X. DOI 10.1016/j.solener.2010.12.023. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023>.

SOLGI, E., HAMEDANI, Z., FERNANDO, R., SKATES, H. y ORJI, N.E., 2018. A literature review of night ventilation strategies in buildings. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 173, no. June, pp. 337–352. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2018.05.052. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.052>.

SONG, C., LIU, Y., ZHOU, X., WANG, X., LI, J. y LIU, J. 2016. Temperature field of bed climate and thermal comfort assessment based on local thermal sensations. *Building and Environment* [en línea]. Vol. 95, pp.

381-390. ISSN 03601323. DOI 10.1016/j.buildenv.2015.09.023. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.09.023>.

SU, Y., RIFFAT, S.B., LIN, Y.L. y KHAN, N. 2008. Experimental and CFD study of ventilation flow rate of a Monodraught™ windcatcher. *Energy and Buildings*. Vol. 40, no. 6, pp. 1110-1116. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2007.10.001.

SYNNEFA, A., SANTAMOURIS, M. y LIVADA, I., 2006. A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. *Solar Energy*, vol. 80, no. 8, pp. 968–981. ISSN 0038092X. DOI 10.1016/j.solener.2005.08.005.

YAO, R. y STEEMERS, K., 2005. A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK. *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 6, pp. 663–671. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2004.09.007.

YARKE, E. y MERMET, A., 2005. Ventilación natural de edificios. 1a ed. Buenos Aires, Nobuko. 140p. ISBN 987584036X.

ZARANDI, M.M., 2009. Analysis on Iranian Wind Catcher and Its Effect on Natural Ventilation as a Solution towards Sustainable Architecture (Case Study: Yazd). *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Humanities and Social Sciences*, vol. 3, no. 6, pp. 668–673.