

El potencial de la chimenea solar como estrategia de ventilación natural en Santiago

Camila Da Rocha Hendzel

Escuela de Arquitectura, Pontificia Universidad Católica de Chile
cdarocha@uc.cl

Claudio Vásquez Zaldivar

Escuela de Arquitectura, Pontificia Universidad Católica de Chile
cvz@uc.cl

Artículo producido a partir de la tesis desarrollada en el Magíster en Arquitectura
Sustentable y Energía
Profesor guía: Claudio Vásquez

<https://doi.org/10.7764/AA.2024.17>

Resumen

En climas cálidos con altos índices de radiación, como el de Santiago, la ventilación desempeña un papel crucial para asegurar una óptima calidad del aire interior y condiciones de confort térmico. La ventilación natural se posiciona como un elemento fundamental en el diseño pasivo, representando un medio eficaz para ahorrar energía que, de lo contrario, se destinaría a sistemas mecánicos de ventilación y refrigeración.

Entre las estrategias de ventilación natural para este tipo de climas, destaca la chimenea solar, un dispositivo autónomo que aprovecha la energía solar para impulsar el flujo de aire en el interior de un edificio mediante diferenciales de presión. Esta estrategia, sin embargo, no ha sido explorada en el contexto local para la ventilación en edificios en altura, aun cuando presenta un gran potencial tanto a escala de edificio como para el confort de los usuarios. En contraste, las nuevas edificaciones en altura destinadas a uso comercial, a pesar de cumplir con altos estándares constructivos, presentan demandas energéticas considerables para su operación, lo que resulta en un bajo rendimiento higrotérmico. Este fenómeno surge de un enfoque arquitectónico que renuncia su relación con las condiciones climáticas.

El objetivo de este trabajo es estudiar la ventilación natural a través de la chimenea solar como una estrategia para la ciudad de Santiago, evaluando su desempeño y movimiento de aire generado y analizando la variabilidad en el comportamiento a partir de un estudio de sus variables geométricas.

Palabras clave: chimenea solar, dimensionamiento, ventilación natural, estrategia pasiva.

INTRODUCCIÓN

A escala global, el uso de energía se encuentra en constante crecimiento debido al desarrollo económico que, entre otras cosas, se expresa en la expansión de las ciudades. Estas crecen por medio de edificios cada vez más altos para brindar accesibilidad, comodidad, diversidad y vitalidad al espacio urbano (Yeang 2001). Por ese motivo, el desarrollo de los elementos que componen la edificación en altura, debe apuntar a una optimización energética global, considerando especialmente los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) que sustentan su habitabilidad.

Para producir un ambiente interior confortable es necesario controlar los flujos de ganancias y pérdidas de calor con el exterior. Estos flujos son los siguientes: conducción, ventilación, radiación solar, ganancias internas y evaporación. Pueden controlarse de forma activa o pasiva, dependiendo de esto, en gran medida, el desempeño energético del edificio. Entre dichos flujos, la ventilación está directamente vinculada con el confort humano, ya que, a mayor velocidad del aire, aumenta la pérdida de calor por convección y evaporación, provocando una sensación de frescor en las personas, aun cuando no disminuya la temperatura del aire (Wood y Salib 2013) (FIG. 01). Esto significa que, a pesar de que la temperatura sea elevada, al aumentar el movimiento del aire se amplía la zona de confort para las mismas condiciones higrotérmicas ambientales. Además la renovación de aire es crucial para proporcionar un ambiente saludable para el usuario, dado que permite eliminar el aire viciado (León Vázquez 2017).

Por otra parte, la ventilación natural es una estrategia clave para el diseño de edificios eficientes, debido a su aporte en el ahorro de energía para la ventilación mecánica y refrigeración (Hoelscher et al. 2016; Larsen et al. 2019), ya que tiene el potencial de reducir los costos de mantenimiento y de operación de los equipos mecánicos, disminuyendo el espacio requerido para albergar dichos equipos (Wood y Salib 2013). Sin embargo, su funcionamiento es dinámico ya que depende del contexto climático, por lo que para edificios en altura, donde se requiere un mayor control del ambiente térmico interior, no es posible depender completamente de ella. Es por esto que se aplica en sistemas híbridos que la activan en los periodos en que las condiciones climáticas lo permitan (Wood y Salib 2013).

La ventilación natural funciona a partir de dos mecanismos, por diferencias de presión de viento o por flotabilidad (Wood y Salib 2013). El primero se da cuando el viento exterior genera diferenciales de presión en torno a la envolvente del edificio, y depende de su geometría, de su contexto y de la dirección y velocidad del viento (Wood y Salib 2013). La ventilación por flotabilidad, también conocida como “efecto chimenea”, se produce por el diferencial de densidad del aire generado por su contenido de humedad y por los diferenciales de

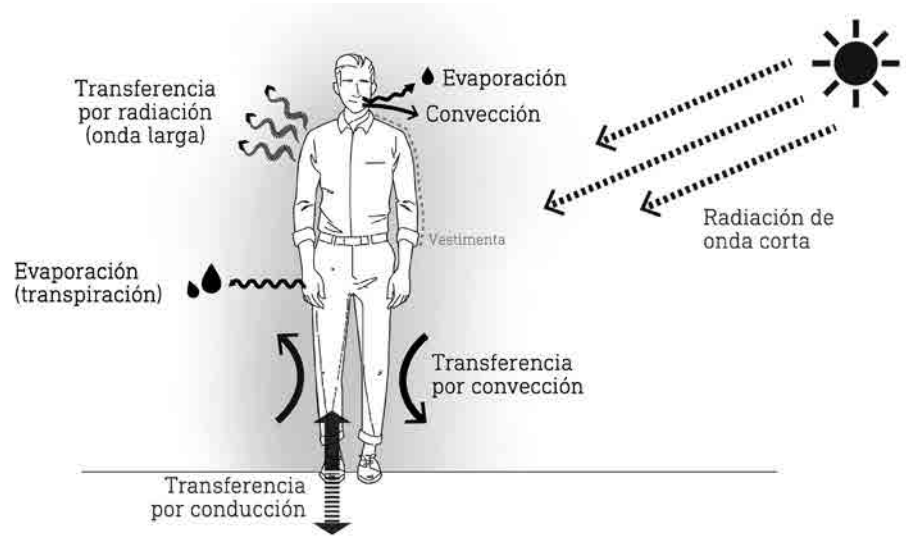


FIG. 01: Esquema de variables de confort térmico y el mecanismo de regulación humana. Fuente: elaboración propia, 2022.

temperatura y de altura entre la entrada y salida del aire (Wood y Salib 2013).

En climas secos y con altos índices de radiación solar, como el de Santiago, la ventilación natural es una de las estrategias más eficientes, después de la sombra, para alcanzar el confort higrotérmico (Gallardo et al. 2016). No obstante, es esencial reconocer sus limitaciones, sobre todo cuando las temperaturas exteriores exceden el rango de confort. En tales circunstancias, la ventilación natural por sí sola puede volverse ineficaz para disipar el calor acumulado, limitando su aplicabilidad. Para superar estas limitaciones, la consideración de otras opciones, como el enfriamiento evaporativo, podría mejorar aún más la eficacia de la ventilación en condiciones climáticas desafiantes.

Sin embargo, en este tipo de climas, sin una ventilación adecuada, el aumento de temperatura y humedad interior generado por las ganancias internas incrementa en gran medida la sensación de discomfort (Gallardo et al. 2016; León Vázquez 2017). El beneficio de la ventilación en verano es evidente, ya que colabora en la disipación de las ganancias de calor acumuladas por la envolvente, las personas y los equipos. En invierno, a pesar de que las ganancias internas se pueden utilizar como estrategia de calefacción, es necesario contar con renovaciones de aire controladas para mantener la calidad del aire en el interior (Yeang 2001). Considerando estas variables y escenarios, se entiende la importancia de estudiar su integración para mejorar las condiciones de confort durante el año completo.

En síntesis, en el contexto climático de Santiago, resulta coherente estudiar estrategias de ventilación inducida por el sol a través de chimeneas solares cuya ventaja es que transforma la energía térmica en energía cinética aportada de forma

directa a los sistemas de climatización artificial (López Ruiz et al. 2019). Por otra parte, su correcto dimensionamiento propicia la uniformidad en las temperaturas internas de forma pasiva (Baez y Gordon 2011).

LA CHIMENEA SOLAR

La chimenea solar es un dispositivo de ventilación natural convectiva que, correctamente aplicada, supone ahorros significativos en el consumo energético de climatización y permite mantener espacios interiores saludables (Yeang 2001). Asimismo, puede producir un efecto refrigerante para los ocupantes del edificio, dado que extrae el aire caliente del interior e incita un incremento en la velocidad del aire, potencialmente aumentando la sensación de bienestar (León Vázquez 2017).

Este dispositivo funciona amplificando el diferencial de temperatura entre la entrada (inlet) y la salida del aire (oulet). A partir del fenómeno de efecto invernadero, producido en un espacio acristalado al final del recorrido de la columna de aire, capta energía solar para transformarla en calor y transmitirlo por convección para aumentar la temperatura del aire y disminuir su densidad. Esto último aumenta proporcionalmente el flujo y velocidad de la columna de aire al interior de la chimenea (FIG. 02). El rendimiento se ve favorecido a medida que la radiación solar se intensifica, incrementando en el tiempo, la tasa de renovaciones de aire interior. En esto radica su idoneidad como estrategia de ventilación natural en climas de alta radiación solar, como el de Santiago, donde la ventilación de la edificación en altura es convencionalmente realizada a partir de sistemas mecánicos.

En el contexto global, existen edificios en altura que consideran el uso de chimeneas solares en edificios con más de veinte pisos de altura. Ellos son: The Tower at PNC Plaza (2015) de Gensler

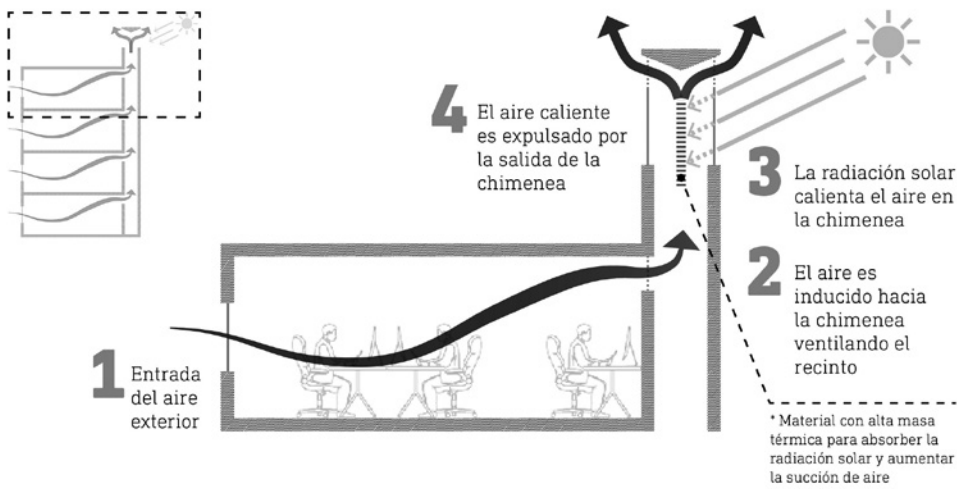


FIG. 02: Esquema del principio de funcionamiento de una chimenea solar. Fuente: elaboración propia, 2022.

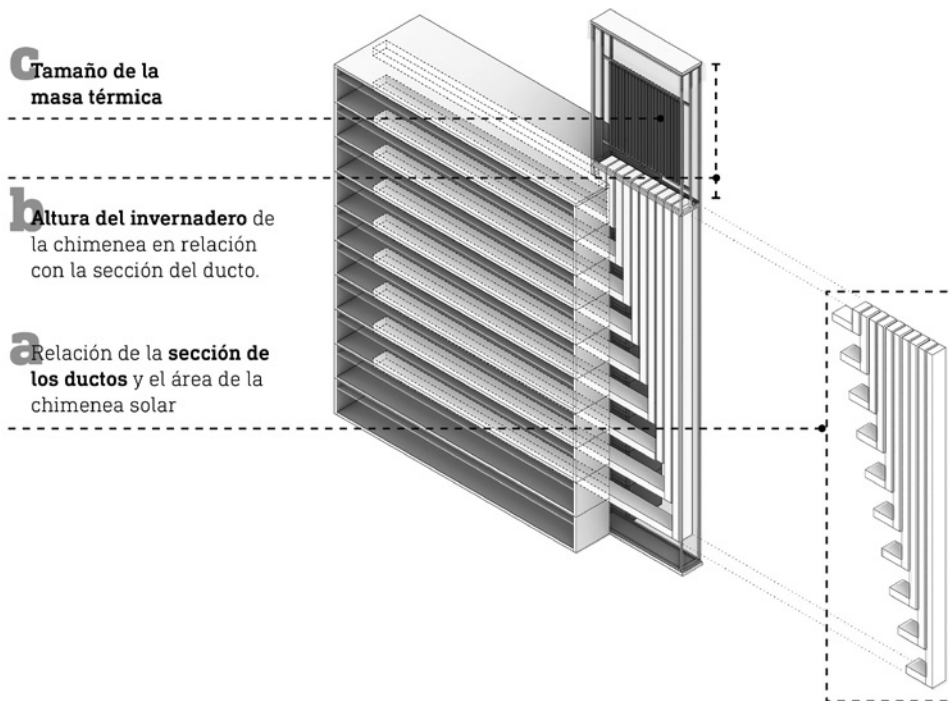


FIG. 03: Esquema volumétrico de la distribución de los ductos por el edificio y su relación con la chimenea solar y el invernadero. Fuente: elaboración propia, 2022.

en la ciudad de Pittsburgh en Estados Unidos y el edificio Manitoba Hydro Place (2009) de KPMB Architects, ubicado en Winnipeg, Canadá. El primero, combina el uso de una fachada de doble piel inteligente que permite el ingreso del aire exterior cuando las condiciones climáticas son idóneas, para que circule por el edificio. Este aire es luego conducido por dos ductos verticales ubicados en el centro del edificio hacia el exterior, utilizando la fuerza térmica generada por el invernadero ubicado en el plano de la cubierta del edificio (Berg 2016). Por otra parte, el Edificio Manitoba Hydro, utiliza tres atrios de seis pisos de altura que funcionan como sala de máquinas donde el aire se enfría por evaporación a través de una cascada de agua y posteriormente es distribuido por las plantas de oficinas, desde donde

es evacuado por una chimenea solar, alcanzando una reducción de 65% del consumo de calefacción del edificio (Kuwabara et al. 2009). Ambos casos, ratifican la importancia del estudio de la chimenea solar para suplir de forma pasiva las demandas de climatización, contribuyendo a ahorros importantes de energía.

Varios autores han investigado el funcionamiento, dimensionamiento y uso de chimeneas solares. El primer estudio enfocado en la modelación del comportamiento del aire dentro de una chimenea solar fue desarrollado por Bansal, Mathur y Bhandari (1994), quienes propusieron los primeros modelos de cálculo para evaluar su potencial de ventilación. Otro modelo para edificios residenciales fue realizado

en la ciudad del Cairo por Hosien y Selim (2017), quienes evaluaron su desempeño en función de parámetros geométricos y de la materialidad de la chimenea solar. Los resultados señalan que, al duplicar la altura, el ancho y el largo de la chimenea, aumentan las renovaciones de aire por hora en un 18%, 78% y 63% respectivamente. Además, para todo el año se obtuvo una tasa de ventilación mayor a tres renovaciones de aire por hora y, dependiendo de la materialidad, se logró superar las seis renovaciones por hora.

Dentro de los estudios experimentales para edificios de mayor escala, se encuentra el trabajo desarrollado por Ding et al. (2005), quienes analizaron el rendimiento de la ventilación generada por una doble piel diseñada como una chimenea solar en un prototipo de escala reducida, simulando un edificio de oficinas de ocho pisos. De forma paralela, se hizo un análisis digital de dinámica de fluidos (CFD), determinando que al aumentar la altura del cabezal de la chimenea, aumenta la tasa de ventilación y se logra obtener una mejor distribución en el diferencial de presión.

Los estudios anteriores demuestran que la chimenea solar es un artefacto flexible desde el punto de vista de su diseño, ya que su funcionamiento no está sujeto a la velocidad del aire exterior sino al diferencial de presión entre su *inlet* y su *outlet*. Esto significa que puede ser adaptada y aplicada a diferentes escalas para ventilar naturalmente recintos gracias a que es un dispositivo que “no depende de otros factores más que los básicos para su propia operación” (León Vázquez 2017, 29). Es por esto que resulta fundamental conocer parámetros y criterios de diseño para evaluar su comportamiento de acuerdo con los requerimientos particulares de cada caso, de manera de lograr disminuir el consumo energético del edificio y proporcionar las condiciones ambientales adecuadas a sus ocupantes.

Las principales características relacionadas con funcionamiento de este dispositivo son: la relación de la sección de los ductos y el área de la chimenea solar, la altura del invernadero de la chimenea en relación con la sección del ducto y el tamaño de la masa térmica en el invernadero (FIG. 03). Esta relación de dimensiones establece las proporciones adecuadas que permitirán una eficiente operación de la chimenea solar. Así, es posible identificar dos elementos principales: el invernadero y el sistema de ductos verticales que conectan los recintos con el cabezal.

El invernadero determina cuánta energía este elemento permite absorber y transformar en calor para lograr evacuar los volúmenes de aire necesarios. Por ello, se debe cumplir con las dimensiones, ubicación y tamaño de la masa térmica y así generar el diferencial de temperatura requerido para su funcionamiento. Las variables geométricas de los ductos, es decir, el área de sección y la distancia entre la abertura de entrada de aire inferior y de

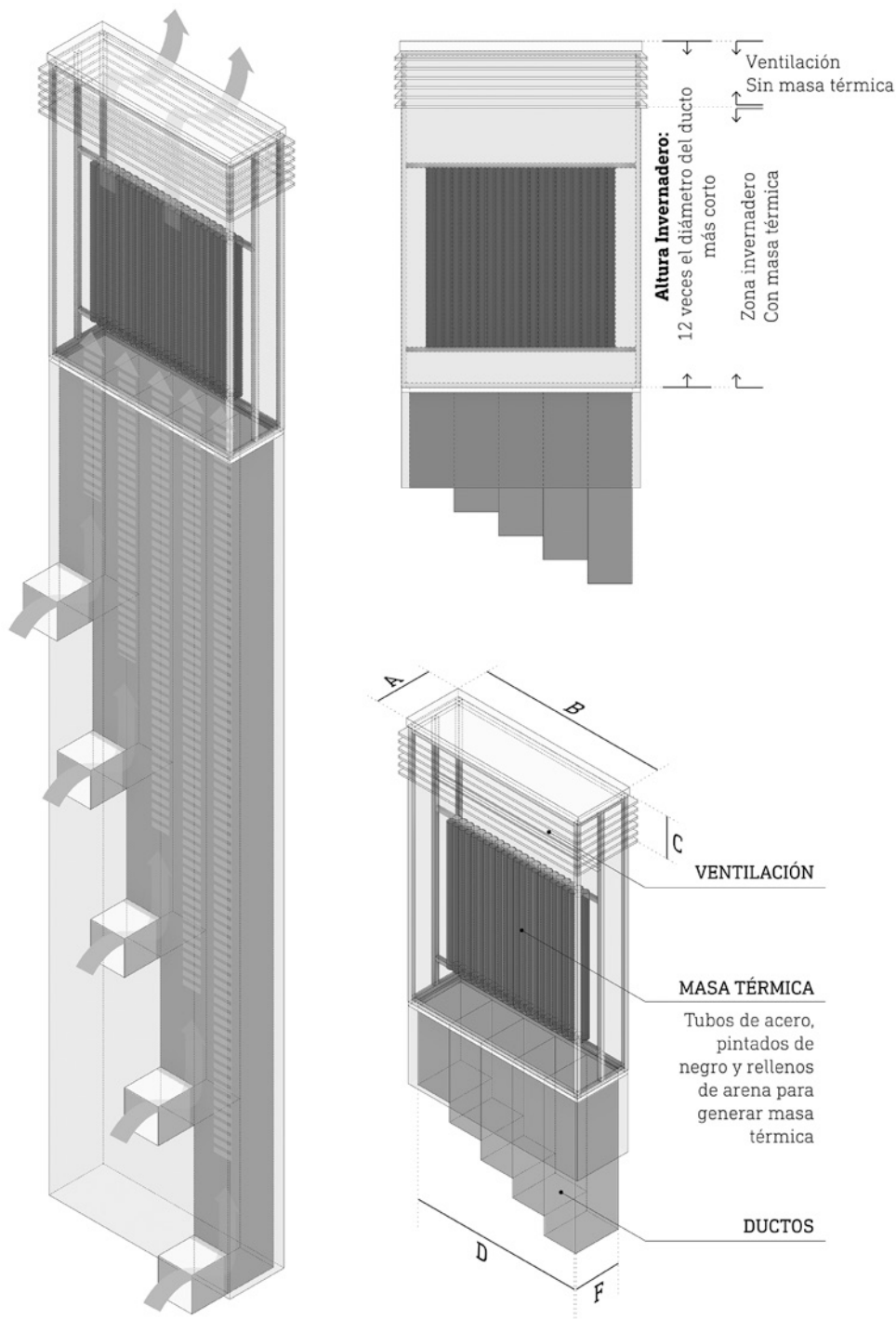


FIG. 04: Esquema de los componentes de la chimenea solar. Fuente: elaboración propia a partir de las recomendaciones de diseño de la chimenea de GEAF UC, 2022.

la salida superior, están directamente relacionadas con la magnitud del flujo de aire. Esto significa que en un edificio en altura, los diferentes pisos no presentan el mismo desempeño, dado que a mayor distancia entre las aberturas, las diferencias de temperatura y presión son mayores, lo cual incrementa el intercambio de aire (Hosien y Selim 2017; León Vázquez 2017; Moosavi, Zandi, y Bidi 2018). Sin embargo, es posible equilibrar estas diferencias mediante el dimensionamiento del área de sección del ducto a modo de obtener un comportamiento homogéneo en todo el edifi-

cio, considerando que una mayor área permite el movimiento de un mayor volumen de aire (GEAF UC 2019; León Vázquez 2017).

METODOLOGÍA

Con el objetivo de cuantificar y analizar la variabilidad del comportamiento de una chimenea solar, se realizó un estudio del dimensionamiento como estrategia de ventilación de un edificio en Santiago. En este proceso, se iteraron las variables geométricas de altura (correspondiente a los diferentes pisos del edificio) y de sección de área del

ducto, considerando cuatro alternativas: $0,5 \text{ m}^2$, 1 m^2 , $1,5 \text{ m}^2$ y 2 m^2 . Esto permitió dimensionar los elementos de la chimenea en relación con el volumen de aire que contiene cada piso del modelo.

El modelo desarrollado consiste en un volumen teórico de diez pisos orientado hacia el noroeste con un área de 450 m^2 (FIG. 04). Para obtener los recintos base para el estudio, se dividió el volumen en secciones de dos pisos (considerando una altura de 3 m por piso), modelados de modo que su fachada principal sea enteramente vidriada y los demás muros de hormigón. Además, se estableció que el piso y el techo son adiabáticos¹.

El cálculo del desempeño de la chimenea solar se basó en el modelo matemático desarrollado por GEAF UC² como herramienta de medición sensible a las variables que se busca estudiar. El modelo se desarrolló como una definición en la plataforma de programación de Grasshopper (Versión 1.0.0007 – 2020) y Rhinoceros (Versión 6 SR24 – 6.24.20079.23341 – 2020), utilizando como motor de cálculo EnergyPlus a través del plugin Climate Studio (Versión 1.3.7871.19685).

A partir de estos componentes, el modelo combina la simulación del desempeño energético y térmico, obteniendo como resultado: las tasas de ventilación o renovaciones de aire producidas, la velocidad de la masa de aire por cada iteración y un calendario de funcionamiento anual de la chimenea solar a partir de la aplicación de un algoritmo de control.

Este algoritmo se define en base a las temperaturas de entrada y salida de la chimenea solar, dado que estas determinan el diferencial de presión y por consiguiente, la velocidad de extracción del aire. Los valores de la temperatura de entrada corresponden a la temperatura exterior, proveniente del archivo de clima de Santiago. Sin embargo, la temperatura de salida corresponde a la temperatura generada en el invernadero cabezal de la chimenea, la cual depende de las características del mismo invernadero y de las condiciones climáticas. Para esto se realiza un modelo térmico aislado del invernadero, calibrado en sus dimensiones de acuerdo con las recomendaciones de diseño detalladas por GEAF UC, las cuales consideran las dimensiones del invernadero en relación a la sección de entrada de los ductos y el tamaño de la masa térmica (FIG. 04).

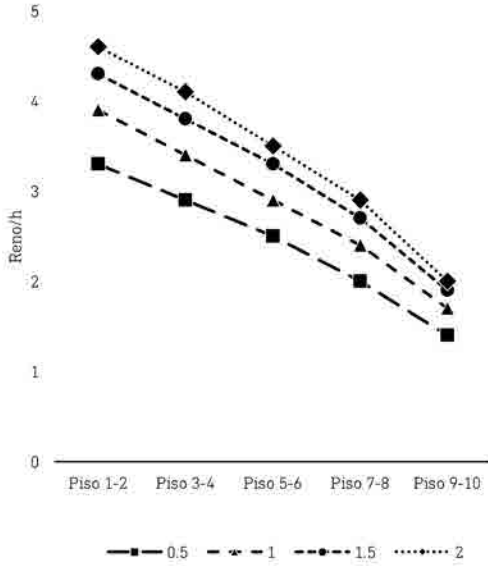
RESULTADOS

MOVIMIENTO DEL AIRE SEGÚN LAS ITERACIONES DEL ÁREA DE SECCIÓN Y ALTURA DE LOS DUCTOS

Los gráficos (FIG. 05) representan cuatro curvas que describen las renovaciones y velocidad del aire según las iteraciones de área de sección del ducto de la chimenea ($0,5 \text{ m}^2$, 1 m^2 , $1,5 \text{ m}^2$ y 2 m^2) en relación a los diferentes rangos de pisos (eje horizontal).

En lo referente al movimiento de aire, se observa que las variables de la dimensión del ducto tienen

RENOVACIONES POR HORA SEGÚN DIMENSIONAMIENTO DEL DUCTO



VELOCIDAD DEL AIRE SEGÚN DIMENSIONAMIENTO DEL DUCTO

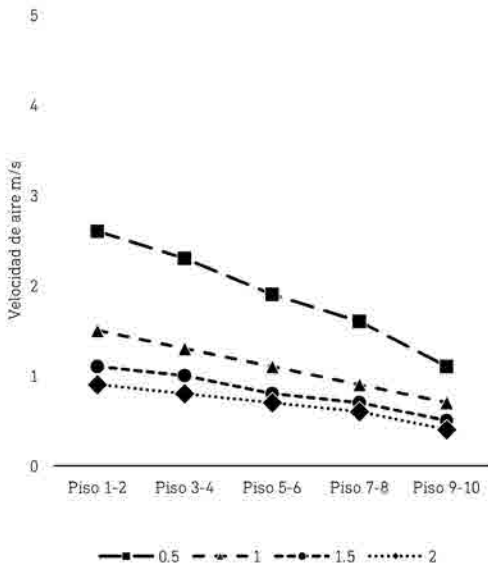


FIG. 05: Gráficos de la relación entre las dimensiones del ducto y las renovaciones del aire y velocidad del aire. Fuente: elaboración propia, 2022.

un gran impacto, tanto en la velocidad del aire como en las renovaciones por hora, demostrando que existe una relación directa entre el tamaño del ducto y el volumen de aire en movimiento. Esto es, a medida que el área de sección aumenta, las renovaciones del aire también se incrementan. Lo mismo ocurre con la altura: las renovaciones del aire aumentan hacia los pisos inferiores, que corresponde a la dirección de incremento de la dimensión vertical del ducto.

No obstante, se observa el efecto contrario para la velocidad del aire en el interior del ducto. Es

decir, a mayor área de sección, la velocidad se reduce, y a mayor altura, la velocidad aumenta.

PORCENTAJE DE FUNCIONAMIENTO DE LA CHIMENEA SOLAR

Es fundamental destacar que esta estrategia se basa en la utilización de un recurso natural, lo que implica que su desempeño no es constante a lo largo del año.

Para analizar la variación temporal de esta estrategia, se calcula el porcentaje de funcionamiento. Este indicador se refiere al volumen de aire que la chimenea puede evacuar durante su operación en comparación con su capacidad máxima de extracción. En otras palabras, representa la fracción de uso en renovaciones de aire que la chimenea logra realizar en cada hora del año.

La FIGURA 06 refleja la relación directa entre las renovaciones por hora y el porcentaje de funcionamiento en función de las diferentes iteraciones de área de sección y altura del ducto. Estos gráficos de regresión permiten observar la tendencia general de la relación entre estas dos variables.

CALENDARIO DE FUNCIONAMIENTO

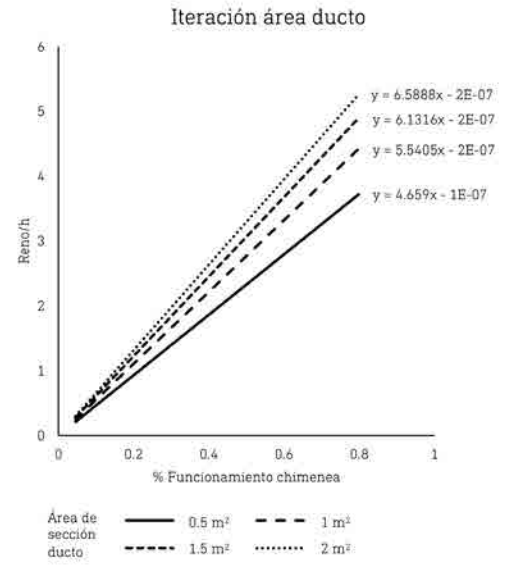
De lo anterior se deduce que es necesario tener en cuenta que el rendimiento de la chimenea depende de la implementación de un sistema de gestión y control de los flujos de extracción. Este sistema garantiza que la chimenea se utilice en los momentos necesarios y de manera eficiente.

Para esto, se elabora un calendario de ventilación anual (FIG. 07) a partir de un algoritmo que evalúa las condiciones ambientales interiores y exteriores de acuerdo con el modelo de confort adaptativo. De esta manera, si las condiciones ambientales son aptas e implica un beneficio ingresarlas en el recinto como medio de climatización natural, se activa el uso de la chimenea; de lo contrario, se depende de mecanismos de refrigeración o calefacción activos.

Es importante destacar que, en el clima de Santiago, la ventilación natural a través de la chimenea solar tiene un rendimiento limitado, principalmente durante el invierno, debido a la predominancia de las bajas temperaturas exteriores que no cumplen con los parámetros de confort. Por lo tanto, esta estrategia se adapta mejor a las condiciones climáticas del verano.

Esta relación entre la temporada del año y la eficacia de la ventilación, se refleja en el promedio de renovaciones por hora para cada estación (FIG. 07). Se puede observar que las tasas de renovación más altas se dan en verano, seguidas por la primavera y el otoño, mientras que las más bajas se registran en invierno. Lo mismo ocurre con el porcentaje de funcionamiento de la chimenea. Además, para todos los periodos, el promedio de renovaciones es más alto durante la noche, la madrugada y parte de la mañana.

RELACION FUNCIONAMIENTO CHIMENERA Y RENOVACIÓN DEL AIRE



ITERACION ALTURA DUCTO

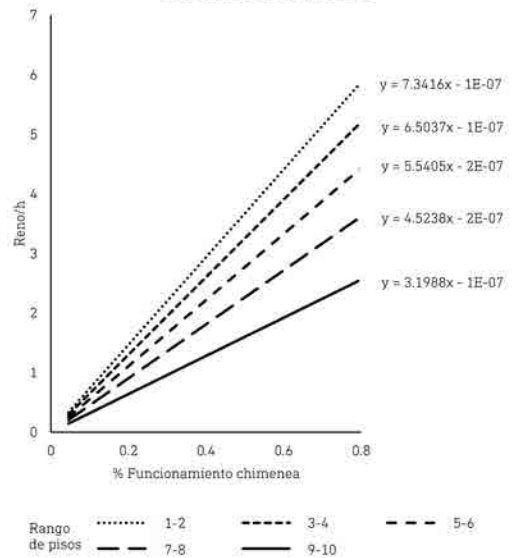
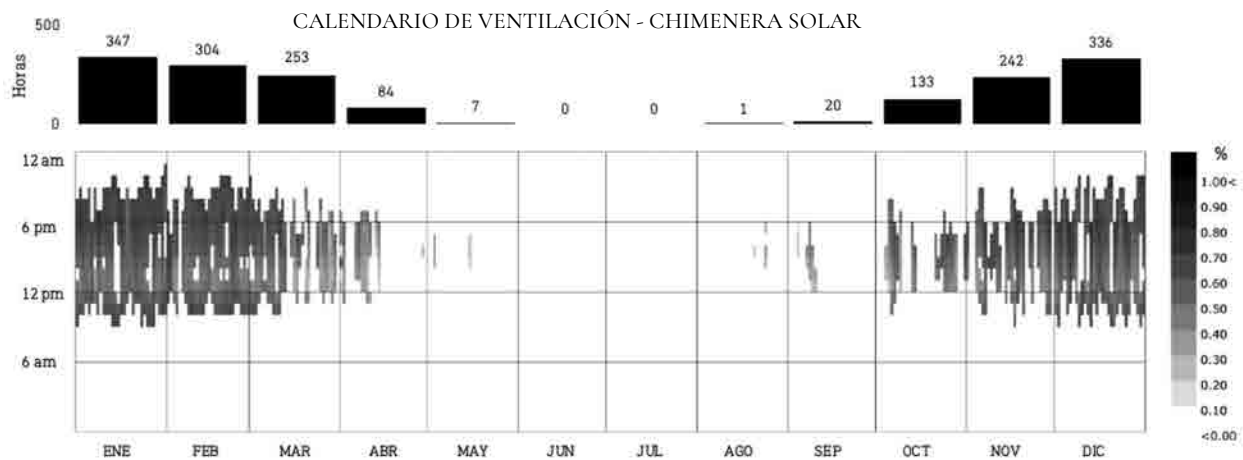
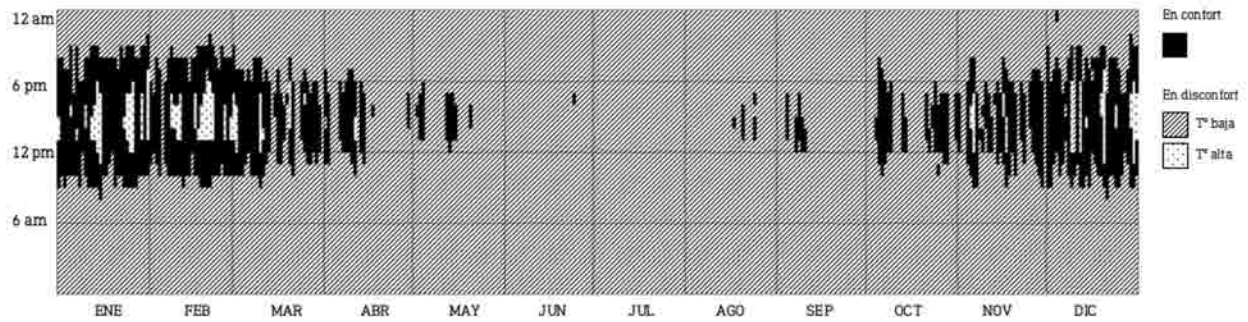


FIG. 06: Gráficos de la relación entre el funcionamiento de la chimenea y las renovaciones del aire y velocidad del aire. Fuente: elaboración propia, 2022.

La influencia de las condiciones climáticas exteriores y la radiación solar se puede apreciar en la FIGURA 08, donde el primer gráfico describe el efecto de la variación de la temperatura de entrada (es decir, la temperatura exterior) en el porcentaje de funcionamiento de la chimenea. Los resultados demuestran que el rendimiento de la chimenea es inversamente proporcional a la temperatura de entrada: cuanto menor es la temperatura, mejor es el rendimiento. Esto se debe a que se genera un mayor diferencial de presión entre la entrada y salida de aire de la chimenea, favoreciendo su

CALENDARIO HORAS DE CONFORT - TEMPERATURA EXTERIOR



PORCENTAJE DE FUNCIONAMIENTO Y RENOVACIONES DE AIRE - CHIMENERA SOLAR

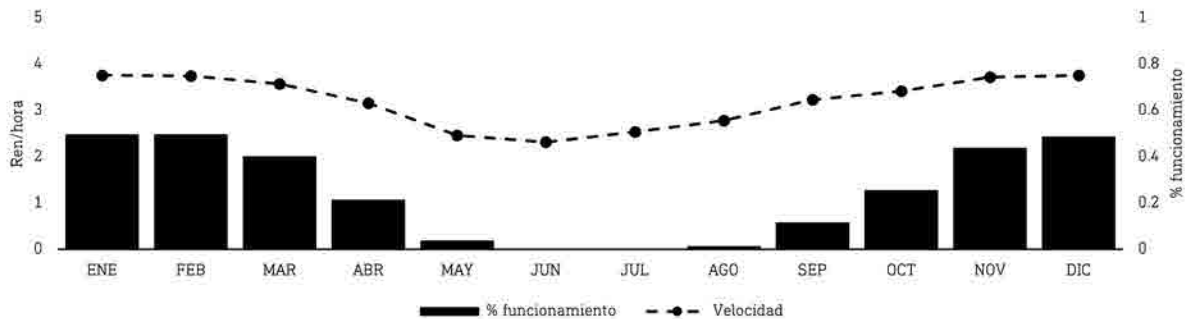


FIG. 07: Calendario de horas de confort a partir de las condiciones climáticas exteriores de Santiago. Calendario de ventilación según el funcionamiento de la chimenea solar. Gráfico del porcentaje de funcionamiento de la chimenea y renovaciones por hora promedio por mes. Fuente: elaboración propia, 2022.

funcionamiento. No obstante, es crucial considerar los parámetros de confort al evaluar estos resultados, ya que la eficiencia debe equilibrarse con las condiciones para asegurar un ambiente cómodo y habitable.

En el segundo gráfico se evalúa la relación entre las renovaciones por hora y la radiación normal global³. Se observa un desempeño lineal en función de la exposición solar, lo que indica que la variable con mayor impacto en el rendimiento es la temperatura de entrada. Por lo tanto, gestionar adecuadamente las diferenciales de temperatura

permite optimizar el funcionamiento de la chimenea en términos de capacidad de extracción de aire.

En resumen, la chimenea solar funciona como la primera fase del sistema ventilación, siempre que su capacidad de extracción de aire sea suficiente para lograr las renovaciones necesarias y enfriar el espacio.

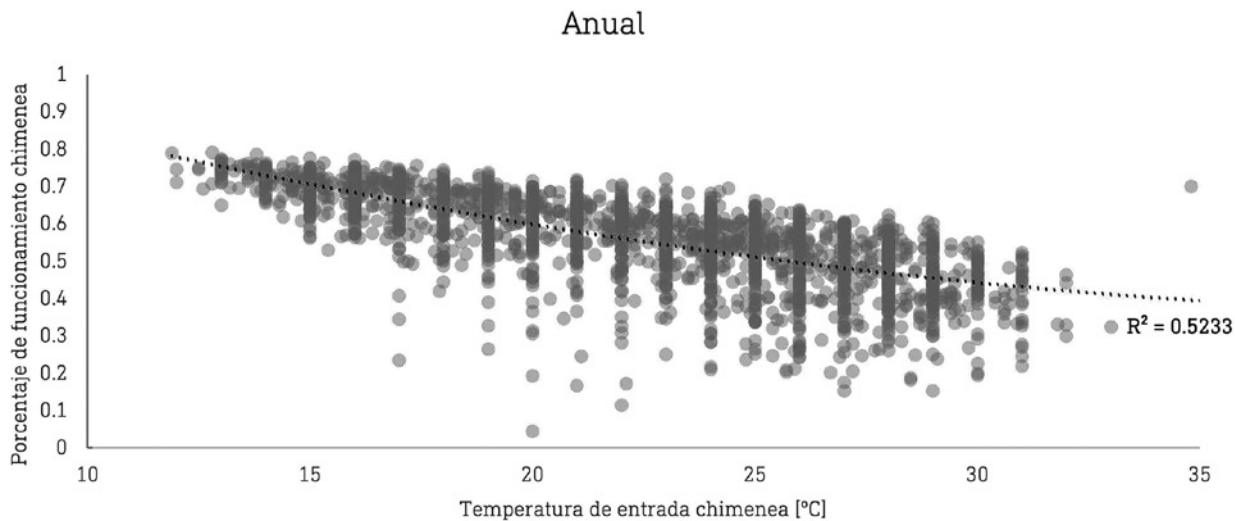
CONCLUSIONES

Sobre la base de los análisis anteriores, se observa el comportamiento variable de la chimenea solar en función del dimensionamiento del ducto. Por ello resulta clave considerar el ducto y sus caracte-

rísticas geométricas como parámetros al momento de seleccionar los valores de diseño de la chimenea. Es decir, se debe buscar un dimensionamiento que permita asegurar un comportamiento uniforme a lo largo del conjunto de edificios y sus pisos.

Adicionalmente, los resultados obtenidos demuestran que la chimenea, si bien presenta un óptimo comportamiento en las épocas más calurosas en Santiago, como el periodo estival, donde la ventilación natural tiene su mayor beneficio, este comportamiento es fluctuante a lo largo del día. En efecto, se observa que en varias oportunidades las temperaturas exte-

RELACIÓN FUNCIONAMIENTO Y TEMPERATURA DE ENTRADA DE LA CHIMENEA



RELACIÓN RENOVACIONES DE AIRE Y RADIACIÓN GLOBAL

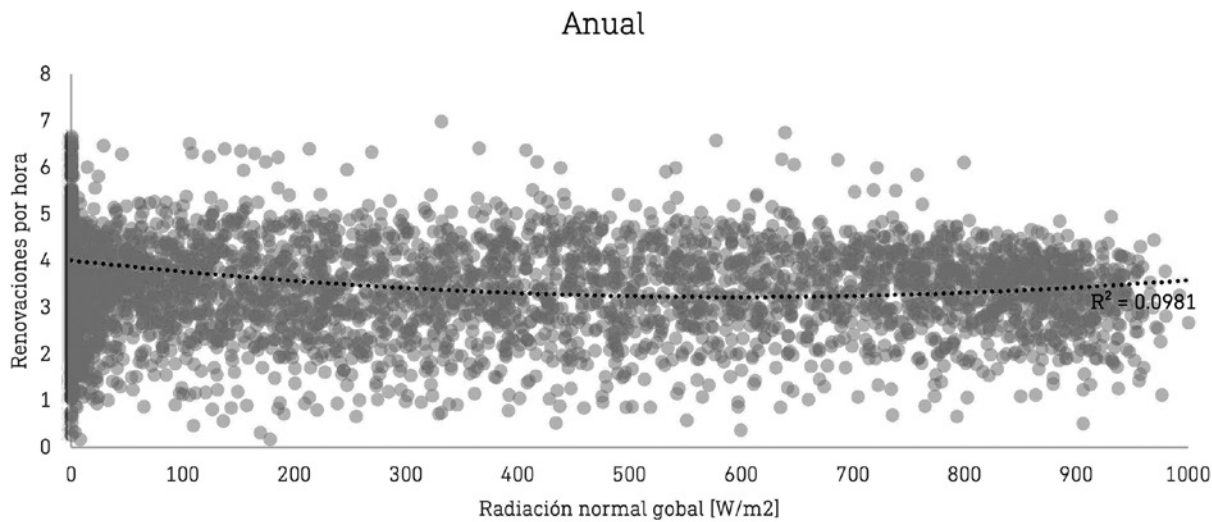


FIG. 08: Gráficos de dispersión de la relación entre el porcentaje de funcionamiento y la temperatura de entrada de la chimenea y la relación entre las renovaciones de aire y la radiación global. Fuente: elaboración propia, 2022.

riores son elevadas, excediendo los rangos de confort, lo que impacta negativamente en su rendimiento. Por este motivo, no es viable prescindir al 100% de los mecanismos de acondicionamiento activo en el edificio, ya que el desempeño de la chimenea está directamente vinculado a las condiciones climáticas externas y a los parámetros de confort determinados.

Por la escala, volumen de consumo, materiales y usuarios que abarcan los edificios de uso comercial, un diseño sensible a las condiciones climáticas y requerimientos de confort de las edificaciones en altura, resulta crucial a la hora de proyectar. Para ello, se debe considerar tanto la escala del edificio como la escala del usuario que se ve altamente afectado por las condiciones térmicas, reiterando la importancia de los factores arquitectónicos en las prácticas energéticas actuales.

Por consiguiente, la importancia de este estudio radica en ampliar el conocimiento en torno a este

tipo de estrategias de ventilación natural para el acondicionamiento de edificios con chimenea solar, considerando sus parámetros de diseño. Se espera que esta información sea un aporte al momento de tomar decisiones de diseño en proyectos de arquitectura.

NOTAS

1- Muros o techos adiabáticos corresponde a aquellos en los cuales no se considera la transferencia de calor a través de estos elementos.

2- El Grupo de Estudio en Arquitectura y Fachadas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (GEAF UC) realizó, como parte del estudio de la aplicación de chimeneas solares, un modelo matemático que permite dimensionar el sistema y funcionamiento de esta estrategia de ventilación natural, en el cual se basó este estudio.

3- La radiación normal global se refiere a la cantidad total de radiación solar incidente que llega a una superficie perpendicular a los rayos del sol. En otras palabras, es la suma de la radiación directa y la radiación difusa que impacta directamente sobre una superficie orientada en la dirección del sol.

BIBLIOGRAFÍA

- Baez, Hugo Francisco, y Manuel Gordon. 2011. "Análisis termico experimental de una chimenea solar adosada a una habitación". <https://es.slideshare.net/robvaler/cusco-hugo-presentacion>
- Bansal, Narendra Kumar, Rajesh Mathur, y Mahabir Bhandari. 1994. "A Study of Solar Chimney Assisted Wind Tower System for Natural Ventilation in Buildings". *Building and Environment* 29, no. 4: 495-500.
- Berg, Nate. 2016. "2016 R+D AWARDS: The Tower at PNC Plaza". *Architect Magazine*. https://www.architectmagazine.com/awards/r-d-awards/award-the-tower-at-pnc-plaza_o.
- Ding, Wenting, Yuji Hasemi, y Tokiyoshi Yamada. 2005. "Natural Ventilation Performance of a Double-Skin Façade with a Solar Chimney". *Energy and Buildings* 37, no. 4: 411-18.
- Gallardo, Nuria, Mauricio Silva, Gustavo Zen de Figueiredo Neves, Adriano Rogério Bruno Tech, y Francisco Arthur da Silva Vecchia. 2016. "Thermal Behaviour in Buildings with Green Covers Combined with Natural Ventilation, Green Facades and Green Roofs". *Journal of Civil Engineering and Architecture* 10.
- GEAF-UC. 2019. "Informe medición de fachadas verde de referencia / territorio torre 4". Santiago de Chile.
- Hoelscher, Marie Therese, Thomas Nehls, Britta Jänicke, y Gerd Wessolek. 2016. "Quantifying Cooling Effects of Facade Greening: Shading, Transpiration and Insulation". *Energy and Buildings* 114: 283-90.
- Hosien, Mohamed, y Shahenda Mohamed Selim. 2017. "Effects of the Geometrical and Operational Parameters and Alternative Outer Cover Materials on the Performance of Solar Chimney Used for Natural Ventilation". *Energy and Buildings* 138: 355-67.
- Kuwabara, Bruce, Thomas Auer, Tom Gouldsborough, Tom Akerstream, y Gleen Klym. 2009. "Manitoba Hydro Place: Integrated Design Process". En *plea 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture*.
- Larsen, Silvana, Celina Filippin, León Marek, y Marcos Hongn. 2019. "Comportamiento Térmico de Una Doble Fachada Verde En Otoño. Resultados Preliminares". En *IBPSA 2019*. Mendoza. https://ibpsa.org.br/misc/documentos/proceedingsIBPSALatamMENDOZA2019/10_003.pdf
- León Vázquez, Juan Carlos. 2017. "La chimenea solar: parámetros de diseño de un sistema pasivo generador de movimiento de aire". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña. <http://hdl.handle.net/2117/115038>
- López Ruiz, Constanza Belén, Silvana Flores Larsen, y Daniel Hoyos. 2019. "Análisis de la eficiencia energetica de una doble fachada verde para el clima de la ciudad de Salta" 23 (December): 01.25-01.32.
- Moosavi, Leila, Majid Zandi, y Mokhtar Bidi. Abril de 2018. "Experimental Study on the Cooling Performance of Solar-Assisted Natural Ventilation in a Large Building in a Warm and Humid Climate". *Journal of Building Engineering* 19: 228-41.
- Wood, Antony, y Ruba Salib. 2013. "Guide To Natural Ventilation in High Rise Office Buildings". *Open Journal of Energy Efficiency* 8, no. 2.
- Yeang, Ken. 2001. *El rascacielos ecológico*. Editorial. Barcelona.