

Ventilación natural

La importancia en la eficiencia energética de edificaciones

José Antonio Castillo-Torres*
Miriam Verónica Cruz-Salas*
Guadalupe Huelasz-Lesbros**
Ramón Tovar-Olvera**

Desde que el hombre tuvo necesidad de resguardarse de la intemperie fue desarrollando soluciones con base en el ensayo y error. Al paso de los siglos, estas soluciones dieron lugar a una arquitectura típica del lugar que incorpora estrategias de climatización y ventilación acordes a las condiciones climáticas. A esta arquitectura se le conoce como vernácula o tradicional (figura 1). A partir de la revolución industrial, en que se empezaron a desarrollar maquinarias para acondicionar el aire, los constructores empezaron a construir las edificaciones sin importar el clima del lugar, resolviendo el problema de la climatización de los espacios con el uso de los sistemas electromecánicos que controlan la temperatura, la humedad y la calidad del aire. Estos sistemas son grandes consumidores de energía.

En los años sesenta del siglo pasado empezó un movimiento dentro de la arquitectura que proponía el regreso a considerar el clima en el diseño de las edificaciones y que se denominó arquitectura bioclimática. Este movimiento ha ido cobrando importancia hasta convertirse en una disciplina dentro de la arquitectura, primero por razones político-económicas y luego por la preocupación de los efectos en la atmósfera por la quema de hidrocarburos. La crisis energética de 1973, cuando los países árabes productores de petróleo embargaron el suministro de crudo a Estados Unidos y recortaron su producción, generó una alarma entre los países

consumidores de hidrocarburos y sirvió para despertar la conciencia sobre el desmedido consumo de energía. Posteriormente, la evidencia sobre la contaminación ambiental producida por la quema de hidrocarburos llevó, en 1997, a la firma de un acuerdo internacional denominado Protocolo de Kioto, que tuvo como objetivo reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global y que son producidos en gran medida por la quema de hidrocarburos. En la actualidad, para efectos de su contribución al calentamiento global, estos seis gases se cuantifican como dióxido de carbono equivalente.

En el Instituto de Energías Renovables (IER) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) se creó un grupo de investigación en Energía en Edificaciones. Este grupo estudia diferentes estrategias para el uso eficiente de la energía para la climatización y ventilación de las edificaciones. Los autores de este artículo pertenecemos a este grupo. El IER se encuentra en la población de Temixco, Morelos, con clima cálido subhúmedo, donde una de las principales estrategias para producir confort térmico en los ocupantes de las edificaciones es la ventilación. Esto nos motivó a incursionar en la investigación de la ventilación, con un énfasis particular en la ventilación natural.

En este artículo presentamos brevemente el panorama del uso de energía en edificaciones a nivel mundial y en nuestro



José Antonio Castillo-Torres
alumno del Doctorado en Ingeniería, Instituto de Energías Renovables, UNAM, México
jacat@ier.unam.mx



Miriam Verónica Cruz-Salas
Alumna del Doctorado en Ingeniería, Instituto de Energías Renovables, UNAM, México
mvcrs@ier.unam.mx



Guadalupe Huelzs-Lesbros
Investigadora del Instituto de Energías Renovables, UNAM, México.
ghl@ier.unam.mx



Ramón Tovar-Olvera
Investigador del Instituto de Energías Renovables, UNAM, México.
rto@ier.unam.mx

país. Introducimos los conceptos de ventilación, ventilación natural, sistemas pasivos de ventilación y confort térmico. Describimos cómo puede usarse la ventilación para el confort térmico y cuál es el potencial de ahorro de energía por utilizar ventilación natural en climas cálidos. Presentamos las investigaciones sobre ventilación en el IER, que incluyen estudios sobre intercambiadores de viento en una habitación, ventilación por efectos térmicos en una habitación que tiene un techo frío y una fuente de calor, así como una propuesta de metodología para evaluar el confort térmico por ventilación. Terminamos este artículo haciendo unas reflexiones a partir de nuestra experiencia en el estudio de estos temas.

Uso de energía en edificaciones

La construcción, operación y demolición de las edificaciones requieren gran cantidad de energía. En el mundo, el consumo de energía para la operación de las edificaciones se estima en 30% del consumo total. Tan sólo a la calefacción y al enfriamiento de los espacios interiores y al calentamiento de agua corresponden la mitad de esa energía (IEA 2011: p. 1). Hay países, como los Estados Unidos, que debido a su clima y a la manera como se han construido las edificaciones que están en uso, el consumo de energía para su operación alcanza 40% del consumo total de energía de ese país (AAEC, 2008: p. 4).

En nuestro país, la energía consumida para la operación de las edificaciones se estima del Balance de Energía considerando los sectores residencial, comercial y público. Esta energía representa 17.7% del consumo total de energía (SENER, 2013: p. 52) (figura 2). Como se observa de estas cifras, la proporción del consumo de energía por la operación de edificaciones en nuestro país es más baja que en Estados Unidos y que a nivel mundial, esto se debe principalmente a que nuestro país tiene climas relativamente benignos.

El consumo de energía tiene serias repercusiones en el ambiente; ya que más de 88% de la energía que consumimos en México proviene de la quema de combustibles fósiles (SENER, 2013: p. 14), responsable de gran parte de las emisiones de gases de efecto invernadero del país. Se estima que la operación de las edificaciones representa 12% de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera de nuestro país (UNEP, 2009: p. 5). El desarrollo de las futuras edificaciones debe ser considerado no sólo por su importancia relativa actual, sino por su crecimiento acelerado y por la duración de las edificaciones. Se estima que en nuestro país de ahora al año 2050 se deberán construir edificaciones para albergar a más de 30 millones de habitantes (Martínez, 2012). Las edificaciones tienen una vida útil mucho mayor que la mayoría de otros consumidores de energía, como los transportes o maquinarias, por lo que la manera en que actualmente construyamos las edificaciones repercutirá en el consumo de energía durante muchos años.

En nuestro país existe poca información sobre la distribución del consumo de energía dentro de las edificaciones, sólo se tiene algo de información del sector residencial, es decir, de la energía consumida en las viviendas. De acuerdo al Balance de Energía de 2012, el consumo de energía por este sector representa 16% del consumo total de energía en nuestro país. Saber cómo se usa esta energía para satisfacer las distintas necesidades dentro de las viviendas no es fácil. Para ello se han realizado diferentes estudios estadísticos basados en información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Los resultados de estos estudios varían un poco dependiendo de la metodología empleada. Para el año de 2008, un estudio estimaba que el consumo de energía por uso de sistemas de aire acondicionado para el enfriamiento en el sector residencial fue de 2.1% del total y 1.2% para calefacción (SENER-AIE, 2011: p. 94), mientras



Figura 1. Ejemplo de arquitectura vernácula en clima cálido húmedo. Basada en Casa Vernácula en Cárdenas, Chontalpa, Tabasco (Torres, 2003). Dibujo de Antonio Castillo.

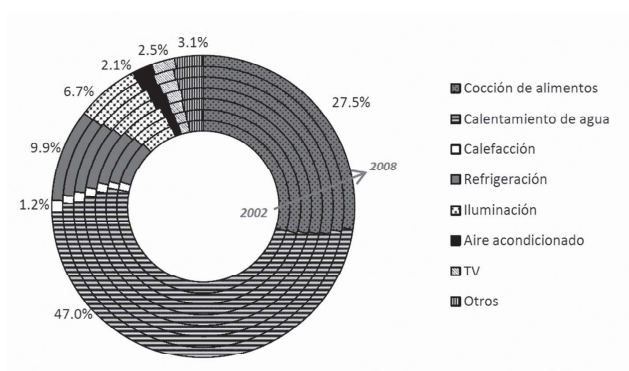


Figura 3. Consumo de energía por usos finales en el sector residencial en México. Tomado de SENER-AIE (2011).

que otro estimaba estas cantidades en 3% y 0%, respectivamente (Rosas-Flores *et al.*, 2011). Estos valores son pequeños pero ambos estudios coinciden en que van en aumento (figura 3). Cuando se analiza sólo el consumo de energía eléctrica, la CFE estimó que para ese año el consumo por aire acondicionado de enfriamiento en el sector residencial fue de 9.3 TWh, correspondiendo a 19.6% del consumo total de energía eléctrica del sector (CFE, 2009). La estimación de la Comisión Nacional de Uso Eficiente de la Energía (CONUE) para esta cantidad es del 17% (CONUEE, 2007).

El aumento en el uso de energía para el acondicionamiento del aire en las edificaciones que se ha dado en los últimos años se debe principalmente a dos factores. Uno es la masificación de la construcción de vivienda que ha ocasionado que éstas se construyan sin considerar el clima del lugar y por lo tanto sean menos confortables térmicamente. Por otro lado, el costo de equipos de aire acondicionado ha ido disminuyendo aumentando su utilización, tanto en viviendas como en edificaciones comerciales y de servicios.

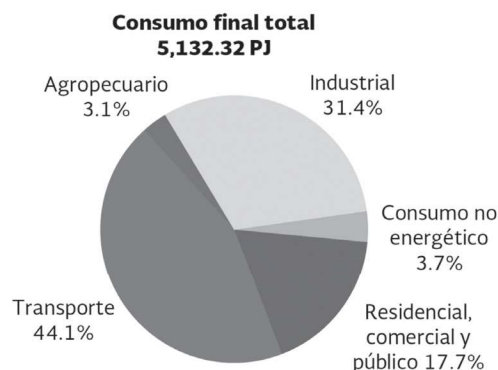


Figura 2. Consumo de energía final por sectores en México. Balance Nacional de Energía, 2013 (SENER, 2013: p. 52).

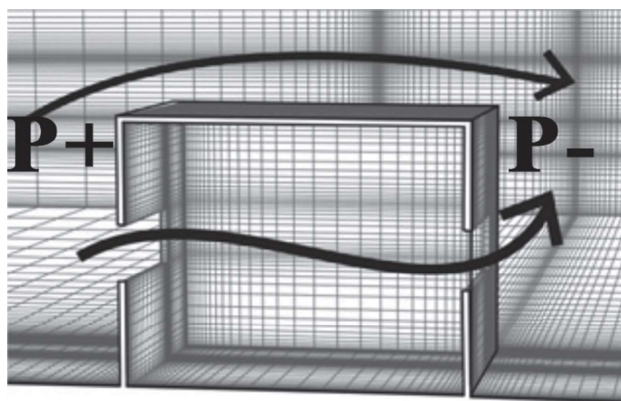


Figura 4. Ventilación por efecto de viento, vista en corte lateral en perspectiva de una habitación con ventilación cruzada. Tomada y modificada de Ramponi y Blocken (2012).

Ventilación natural

La ventilación se puede definir como el cambio de aire en un espacio confinado (Khan *et al.*, 2008). El aire debe ser retirado y sustituido continuamente por aire fresco de una fuente limpia y externa para mantener una buena calidad del aire al interior. Una ventilación deficiente puede causar exceso de humedad, de condensación y de acumulación de olores, de humos, de contaminantes y de dióxido de carbono en concentraciones nocivas. En las edificaciones, la ventilación se genera principalmente de dos formas. La primera se llama ventilación mecánica, que utiliza equipos electromecánicos, generalmente, consumidores intensivos de energía. La segunda es conocida como ventilación natural; este tipo de ventilación no requiere energía externa para promover el movimiento del aire, por lo que es muy conveniente su uso. La ventilación natural se produce por el resultado de dos efectos, por separado o en conjunto, por efecto de viento y por efecto térmico. El primer efecto se debe a las diferencias de presión ocasionadas cuando el viento incide sobre una

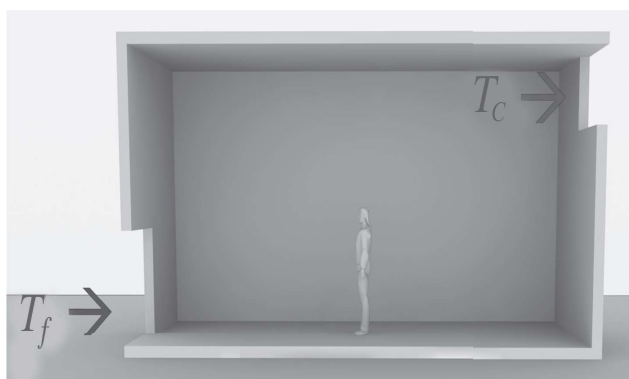


Figura 5. Ventilación por efecto térmico, vista en corte lateral en perspectiva de una habitación con ventilación cruzada. La temperatura T_f es menor que la temperatura T_c .

edificación. En la fachada donde incide el viento, conocida como barlovento, se produce una presión positiva y en las fachadas laterales y la fachada opuesta al viento, a sotavento, se produce una presión negativa. Por ejemplo, cuando se ponen aberturas o ventanas en las fachadas a barlovento y a sotavento, se produce ventilación cruzada por efecto de viento (figura 4). El efecto térmico es causado por la diferencia entre las temperaturas del aire al exterior y al interior de la edificación. Por ejemplo, cuando se ponen dos aberturas o ventanas a diferentes alturas y la temperatura del aire al interior es mayor que la del aire al exterior, el aire interior, por tener mayor temperatura, es menos denso y se eleva saliendo a través de la abertura superior. El aire que sale es reemplazado por aire del exterior a menor temperatura, produciéndose ventilación cruzada por efecto térmico (figura 5). El efecto térmico es dominante durante los períodos de baja velocidad del viento y se reduce en períodos de verano, cuando las diferencias de temperatura son mínimos (Khan *et al.*, 2008).

La arquitectura bioclimática incorpora el uso de sistemas pasivos e híbridos para la ventilación, para el acondicionamiento del aire y para el control solar. En general, los sistemas para la ventilación, para el acondicionamiento del aire, se clasifican en activos, pasivos e híbridos. Los sistemas activos consumen energía externa para su funcionamiento, los sistemas pasivos no requieren ningún consumo de energía externa y los sistemas híbridos son sistemas pasivos con el apoyo de energía externa en pequeña proporción. La ventilación natural utiliza sistemas pasivos que permiten ventilar el interior de la edificación y modificar la temperatura, la humedad y la calidad del aire sin consumir energía externa.

Sistemas pasivos de ventilación

Un parámetro importante para el diseño de sistemas pasivos de ventilación es la orientación de las aberturas de la edi-

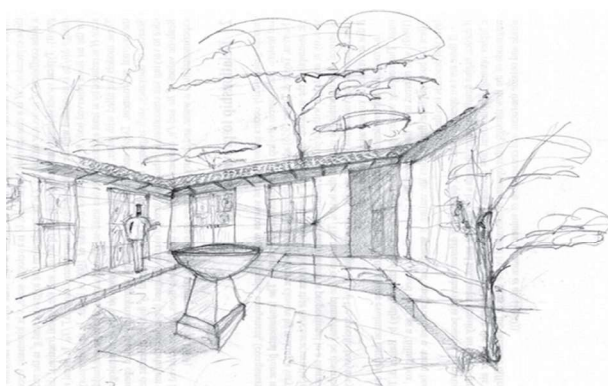


Figura 6. Patio central en la casa del libertador Simón Bolívar, Caracas, Venezuela. Dibujo de Antonio Castillo.

ficación respecto a los vientos dominantes. Cuando existe una dirección preferencial de los vientos dominantes se recomienda orientar las ventanas o aberturas en la dirección del viento, es decir, en la fachada a barlovento. En climas cálidos, que requieren mayor ventilación, se recomienda orientar ventanas a barlovento y a sotavento para propiciar la ventilación cruzada. Cuando existe una limitante para elegir la orientación de la ventana a los vientos dominantes o la ventilación dada por ella es insuficiente, se puede utilizar un sistema pasivo basado en la modificación de las fachadas o el techo de la edificación. En este punto es importante resaltar que el techo de una edificación es a menudo la parte más expuesta al viento proveniente de cualquier dirección, por lo que el empleo de sistemas pasivos de ventilación que involucran al techo puede aumentar considerablemente la ventilación por efecto del viento. Además, al involucrar aberturas a diferentes alturas, a nivel de los espacios habitables y a nivel del techo, se puede incrementar la ventilación por efecto térmico.

Ejemplos de los sistemas pasivos de ventilación que involucran al techo son: atrios y patios centrales, ventiladores de turbina, techos monitor, intercambiadores de viento, chimeneas solares, torres de viento y techos Venturi. A continuación presentamos una breve descripción de estos sistemas. Los atrios y patios centrales (figura 6) son espacios a la entrada de la edificación y al centro de ésta, respectivamente, cuyos techos se encuentran abiertos. Proporcionan una forma eficiente para dirigir el flujo de aire a través de ventanas y puertas, además, proveen de una transición progresiva entre el interior y el exterior. Ambos se han utilizado por siglos en la arquitectura vernácula de varias partes del mundo. Los ventiladores de turbina son equipos que utilizan la fuerza natural del viento para llevar a cabo la rotación de la turbina y crear una zona de presión negativa para extraer el flujo de aire de la habitación a través del él (figura 7). Los techos monitor se construyen en la cresta de un techo a dos aguas,

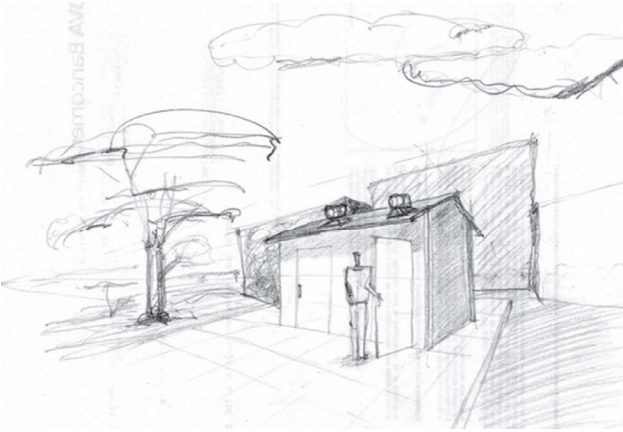


Figura 7. Aplicación de un ventilador de turbina en una unidad sanitaria. Dibujo de Antonio Castillo.



Figura 8. Esquema de una residencia tradicional japonesa que muestra un techo monitor. Basado en Wang *et al.* (2010). Dibujo de Antonio Castillo.

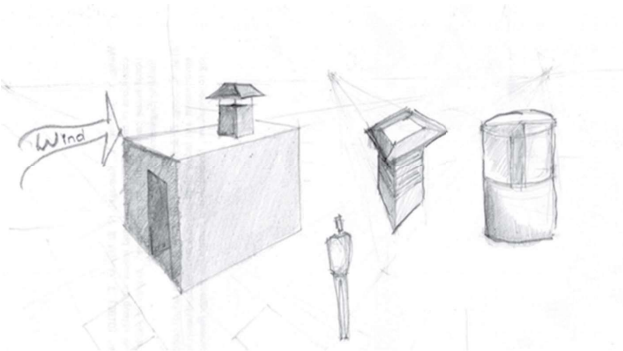


Figura 9. Ejemplos de intercambiadores de viento. Basado en Montazeri (2011). Dibujo de Antonio Castillo.

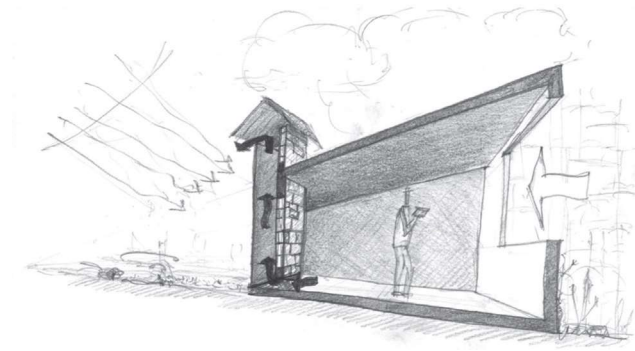


Figura 10. Esquema de una chimenea solar. Dibujo de Antonio Castillo.

con su propio techo funcionando en paralelo con el techo principal. Las aberturas que se forman entre ambos techos están orientadas a barlovento y sotavento, de tal manera que el viento, al pasar por ahí, produce una presión negativa al interior del monitor, provocando la succión del aire al interior, por lo que funcionan como extractores de aire. Los techos monitor se han utilizado en la arquitectura tradicional japonesa (ver figura 8). Los intercambiadores de viento son estructuras relativamente pequeñas que se construyen sobre el techo de una edificación, constituyen un ducto vertical, con o sin subductos, que comunican el interior con el exterior de la edificación y tienen como propósito inducir o incrementar la ventilación natural producida por el viento dentro de la edificación. En la literatura, esta estructura es más conocida como captador de viento (en inglés *windcatcher*). Sin embargo, el nombre de intercambiador de viento define mejor su comportamiento, ya que una misma estructura dependiendo de la dirección del viento puede funcionar como inyector o como extractor del aire y, en algunos casos, puede funcionar simultáneamente como inyector y como extractor (ver figura 9). Las chimeneas solares son ductos verticales

relativamente largos que comunican el interior de una edificación con el exterior. Pintando de negro una o varias de las paredes exteriores del ducto incrementan la absorción de la radiación solar y, con ello, elevan la temperatura al interior del ducto y así aumentan la ventilación natural por el efecto térmico, por lo que siempre las chimeneas solares actúan como extractores de aire (ver figura 10). Las torres de viento son estructuras similares a los intercambiadores de viento, lo que diferencia a estos dos sistemas es que las torres, como su nombre lo indica, son estructuras mucho más altas que los intercambiadores. Las torres de viento, dada su altura, también pueden funcionar por efecto térmico sobre todo en momentos en que la velocidad del viento es baja. Las torres de viento han sido utilizadas desde hace cientos de años en regiones de Asia occidental (figura 11). Los techos Venturi se caracterizan por su forma que produce un efecto conocido como efecto Venturi. Esto es que, al reducir el área por la que fluye el aire o cualquier fluido, la velocidad aumenta y la presión se reduce. Esto permite que abajo del techo Venturi se forme una zona de presión negativa que favorece la extracción del aire abajo del techo. Se han propuesto techos



Figura 11. Fotografía de una torre de viento.

Fuente: <http://arquyma.blogspot.mx/2010/10/yazd-el-control-climatico-de-las.html>

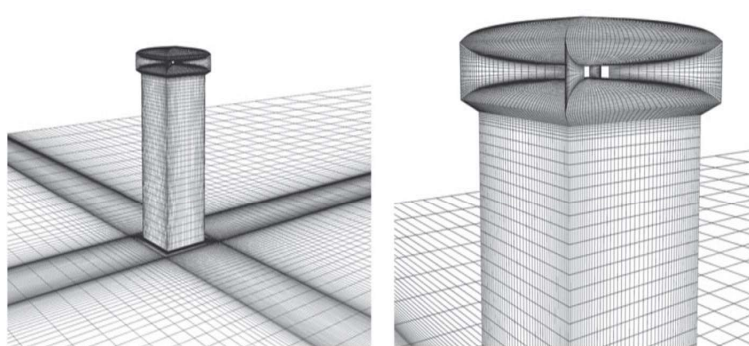


Figura 12. Esquema de un techo Venturi en forma de disco. Tomada de van Hooft (2011).

Venturi en forma de disco que se colocan por encima del techo de la edificación y que producen una succión en la parte central donde estaría un patio central (figura 12). También se han propuesto techos Venturi en forma de ala de avión invertida (ver figura 13).

La transferencia de calor del cuerpo al ambiente por el movimiento del aire y por la evaporación del sudor aumenta con el aumento de la velocidad del aire alrededor del cuerpo humano, de ahí que la ventilación pueda ser utilizada para mejorar el confort térmico, sobre todo en climas cálidos.

Ventilación para el confort térmico

En la arquitectura, el confort se entiende como un estado favorable de salud física y mental del ocupante o usuario de una edificación o espacio exterior que se obtiene a través de los sentidos. De acuerdo con el sentido involucrado se divide en: confort visual, confort acústico y confort térmico (Givoni, 1969). El confort térmico se entiende como aquella condición mental que expresa satisfacción con el ambiente (ISO 7730). Esta condición se obtiene cuando el cuerpo es capaz de mantener el balance térmico con su entorno recurriendo a mecanismos de termorregulación del cuerpo humano pero sin que esto le cause estrés. El cuerpo humano, debido a su metabolismo, produce energía térmica que disipa al ambiente por medio de la respiración, la convección del aire a su alrededor, la evaporación del sudor y por la radiación de onda larga que el cuerpo humano emite como cualquier objeto por tener una temperatura arriba del cero absoluto. La cantidad de energía térmica que el cuerpo produce depende de varios factores, el más importante es la actividad que se encuentre realizando la persona. La cantidad de calor que es intercambiada con el ambiente depende de la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del aire, la cantidad de radiación solar (de onda corta) que reciba el cuerpo y la radiación de onda larga que el cuerpo emita y reciba de sus alrededores, así como la vestimenta de la persona (figura 14). Como el papel que desempeña la humedad relativa es muy importante, el confort térmico también se conoce como confort higrotérmico.

Potencial de ahorro de energía por ventilación natural

La ventilación natural ha sido utilizada desde la antigüedad como una estrategia para mejorar las condiciones de confort térmico dentro de edificaciones en climas cálidos (López, 1987: p. 444; Prieto, 1978: p. 228). En clima cálido seco la variación de la temperatura a lo largo de las 24 horas de un día es grande: en la noche la temperatura puede ser hasta 20 grados centígrados menor que la máxima durante el día. Por lo cual en este tipo de clima, abrir ventanas durante la noche y cerrarlas durante las horas de sol puede reducir la temperatura del aire al interior varios grados centígrados. A este tipo de ventilación se le conoce como ventilación nocturna.

En cambio, en el clima cálido húmedo la temperatura varía poco a lo largo de las 24 horas del día. En este clima la ventilación durante todo el tiempo mejora las condiciones de confort térmico de los ocupantes debido a que el movimiento del aire aumenta la evaporación del sudor. La sudoración es un mecanismo muy importante para la disipación del calor generado por el metabolismo del cuerpo humano.

México tiene una gran variedad de climas, sin embargo, más de 70% corresponde a climas cálidos (INEGI, 2012). Por esto, en nuestro país el potencial del uso de la ventilación para mejorar el confort térmico de edificaciones es importante. En la arquitectura tradicional o vernácula de varias zonas del país con clima cálido se utilizaba la ventilación natural para lograr condiciones más confortables. Sin embargo, con la masificación de la construcción y la disponibilidad de equipos de aire acondicionado de enfriamiento se han deja-



Figura 13. Fotografía de una casa experimental con techo Venturi en forma de ala de avión invertida. Tomada de Chin (2012).

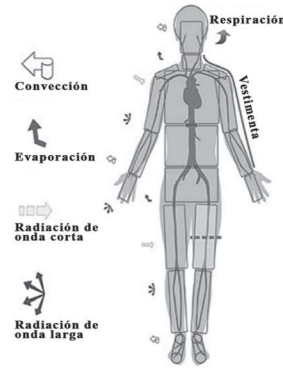


Figura 14. Diferentes mecanismos de intercambio de calor del cuerpo humano con el ambiente. Tomada y modificada de Cheng *et al.* (2012).

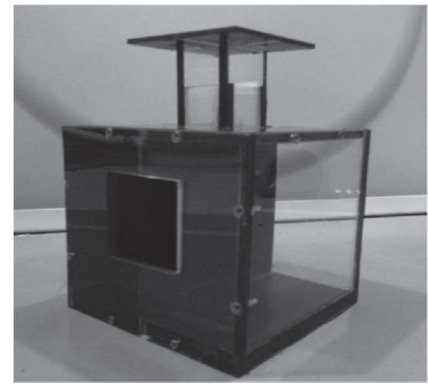


Figura 15. Maqueta de una habitación con una ventana y uno de los intercambiadores de viento.

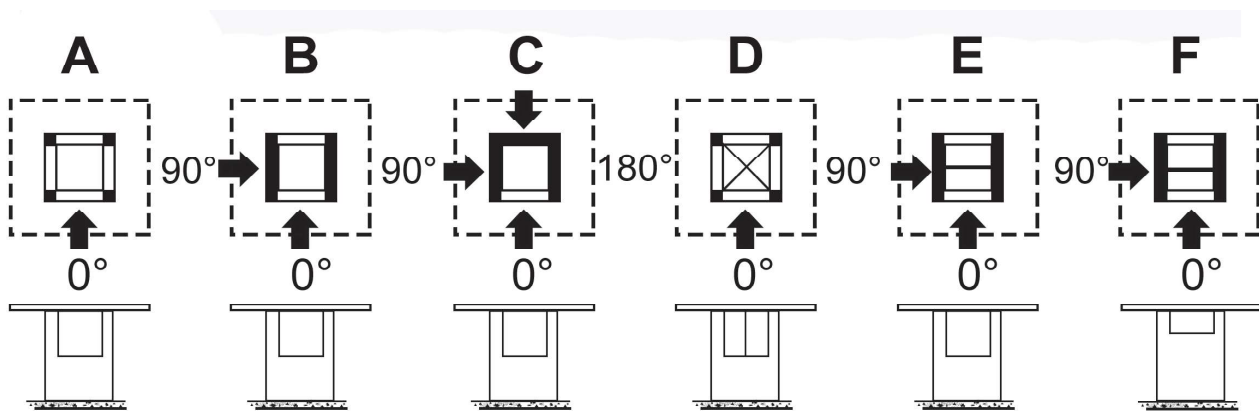


Figura 16. Intercambiadores de viento estudiados. Las flechas indican las direcciones del viento estudiadas. Los intercambiadores de viento D, E y F tienen divisiones que forman subductos.

do de diseñar las edificaciones de acuerdo con el clima y en particular en lo referente al uso de la ventilación natural como forma de mejorar el confort térmico en clima cálido.

En un estudio reciente (Oropeza-Pérez y Ostergaard, 2014) se hizo una estimación del potencial de ahorro de energía en nuestro país por utilizar la ventilación natural en viviendas en climas cálidos. En este estudio se consideró el ahorro de energía en una vivienda como la diferencia entre el consumo de energía en la vivienda por el uso de un equipo de aire acondicionado de enfriamiento para lograr una temperatura de confort sin ventilación y el consumo de energía de la misma vivienda cuando ésta sí está ventilada en forma natural. Se consideró el número de viviendas en el país con aire acondicionado en el año 2008, el cual ascendía a 4,556,514, representando 17% del total de viviendas en el país. El potencial de ahorro de energía se estimó en 4.2 TWh, lo que corresponde a 54.4% de la demanda de energía eléctrica para enfriamiento en el mismo año. Este ahorro en energía conlleva una disminución de las emisiones contaminantes

a la atmósfera, estimada en 2 Mt de CO₂. También significa un ahorro económico anual estimado en 13,500 millones de pesos actuales.

Investigaciones sobre ventilación en el IER

El Grupo de Energía en Edificaciones (GEE) del IER estudia la ventilación, en colaboración con investigadores de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires en Argentina, de la Universidad de Cambridge en el Reino Unido y de la Universidad Tecnológica de Eindhoven en los Países Bajos. Hemos estudiado cómo aumentar la ventilación natural utilizando intercambiadores de viento en una habitación y cómo es la ventilación por efectos térmicos en una habitación que tiene un techo frío y una fuente de calor. También hemos propuesto una metodología para evaluar el confort térmico producido por la ventilación al interior de una edificación.

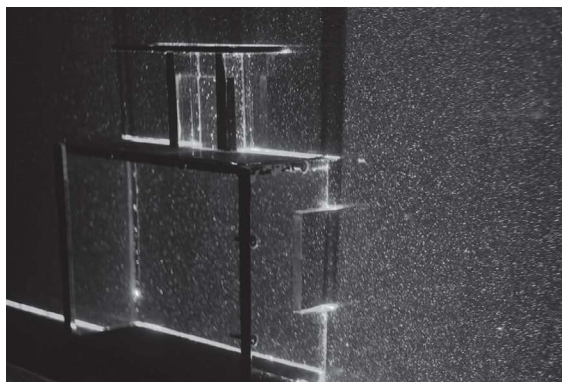


Figura 17. Fotografía donde se muestra el plano iluminado por luz láser en el plano central de una de las maquetas.

Intercambiadores de viento en una habitación

Como ya mencionamos, un intercambiador de viento (IDV) es una estructura pequeña que se construye sobre el techo de una edificación. Constituye un ducto vertical que comunica el exterior con el interior de la edificación y tiene como propósito inducir o incrementar la ventilación natural producida por el viento dentro de la edificación.

Las investigaciones que habían realizado otros investigadores habían analizado sólo el flujo de aire que entraba o salía de la habitación por el intercambiador de viento sin estudiar cómo el flujo de aire se distribuía en el espacio habitable de la habitación. Cuando la ventilación natural se utiliza para mejorar el estado de confort de los habitantes en climas cálidos, tener una distribución del flujo lo más uniforme posible en el espacio habitable es muy importante, por lo que en nuestras investigaciones estamos analizando esto.

Hasta el momento hemos estudiado experimentalmente y con simulaciones numéricas la ventilación producida por diferentes configuraciones de IDV cuando el viento tiene una dirección fija, como sucede en algunas regiones, y considerando que la habitación tiene una ventana en la dirección de donde viene el viento. Esta dirección se conoce como barlovento (Cruz-Salas *et al.*, 2014).

Para la investigación experimental utilizamos un canal de agua a escala reducida. Cuando se hacen experimentos en el laboratorio con el fin de estudiar fenómenos que se llevan a cabo a mayor escala, los experimentos se deben realizar de tal manera que tengan semejanza geométrica y semejanza dinámica con la realidad. La semejanza geométrica se consigue teniendo la misma proporción en las longitudes del experimento del laboratorio y del problema real. En nuestros experimentos utilizamos maquetas con una escala 1:25, esto es, cada longitud en la maqueta corresponde a la

Agradecimientos por parte de los autores y autoras

A Héctor Daniel Cortés, Guillermo Hernández y Alfredo Quiróz por su apoyo técnico en la instalación y programación de los instrumentos, a Maximiliano Valdéz por su apoyo y soporte en la instalación del software de simulación y el apoyo de los proyectos PAPIIT IN113314 y PAPIIT IN114314.

J. Antonio Castillo Torres y Miriam Cruz Salas agradecen sus becas de posgrado por parte de CONACYT.

misma longitud multiplicada por 25 en la escala real (figura 15). La semejanza dinámica nos dice que el comportamiento que observamos en el laboratorio se tendrá en el problema real cuando el número adimensional característico para el problema valga lo mismo en el laboratorio y en la realidad. En el problema de ventilación por viento, el número adimensional característico es el número de Reynolds que relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas.

Para los experimentos consideramos seis tipos de IDV con distintas orientaciones respecto al viento, lo que da once distintas configuraciones (figura 16). Para evaluar el efecto de tener o no un intercambiador de aire en el techo, también se consideró el caso de la habitación sin ningún IDV.

Para analizar la distribución del flujo dentro de la habitación utilizamos una técnica de medición de la velocidad conocida como velocimetría estereoscópica por imágenes de partículas (Tavoularis, 2005). En esta técnica se utilizan dos cámaras para tener una visión estereoscópica como la visión humana con dos ojos. Con cada cámara se toman dos fotografías espaciadas en un pequeño intervalo de tiempo de un plano iluminado por luz láser (figura 17). La técnica permite calcular la velocidad del flujo en el plano iluminado a partir de calcular la velocidad de partículas suspendidas en el fluido. Con esta técnica pudimos medir los campos de velocidad en el plano central de la habitación y con ello conocer la distribución del flujo de ventilación en la habitación y también estimar el flujo volumétrico de ventilación a la habitación a través de la ventana y del intercambiador de viento. En la figura 18 se muestran los campos de velocidad en el plano central de la habitación obtenidos para los doce casos de estudio.

De la investigación experimental concluimos que el uso de intercambiadores de viento puede incrementar considerablemente el flujo de ventilación natural dentro de la habitación respecto a cuando no se tiene ningún intercambiador de viento. Observamos que la ventilación en la habitación

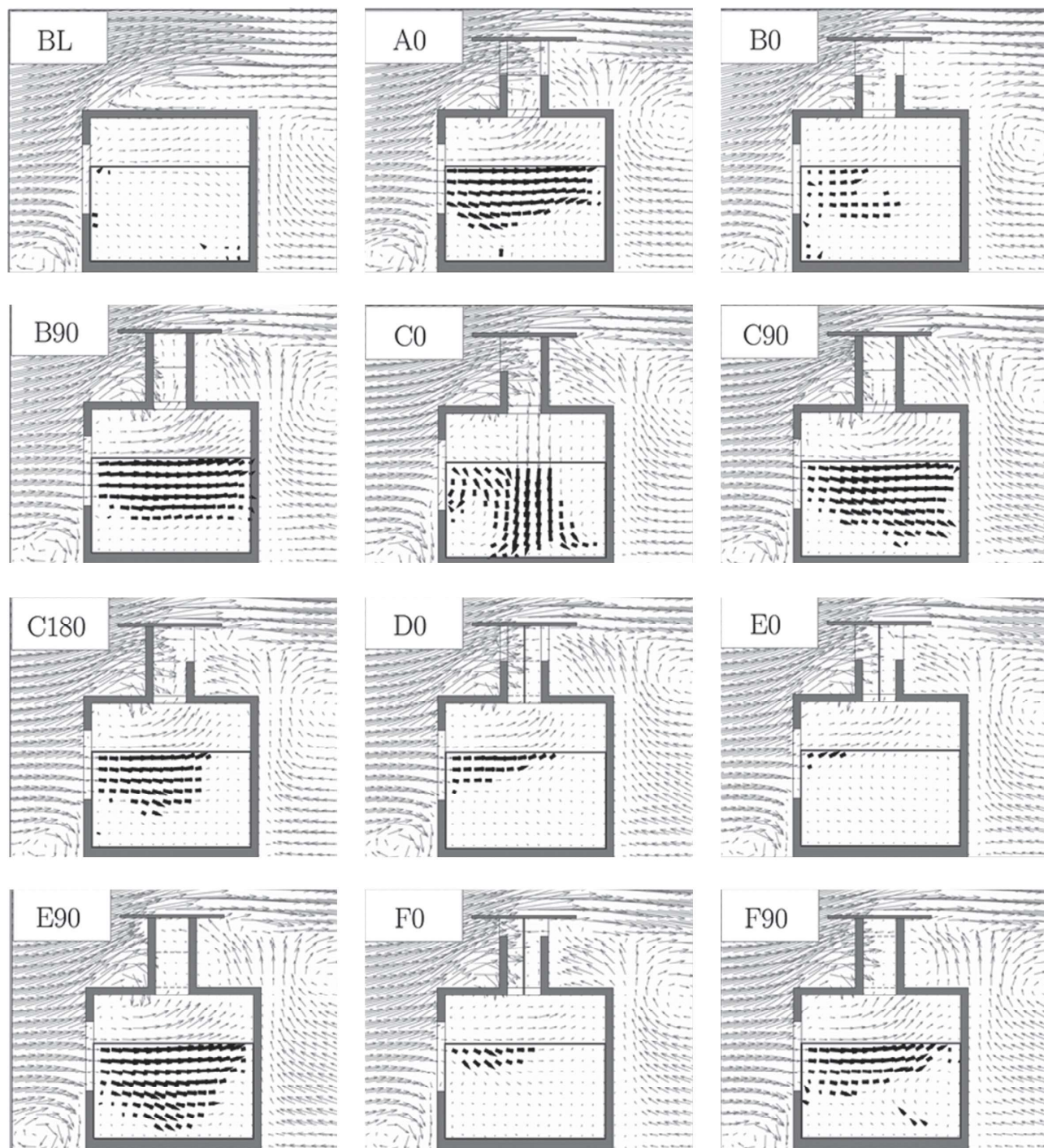


Figura 18. Campos de velocidad en el plano central de la habitación obtenidos para los doce casos de estudio. La línea horizontal a una altura de 1.8 m en la escala real delimita la zona habitable.

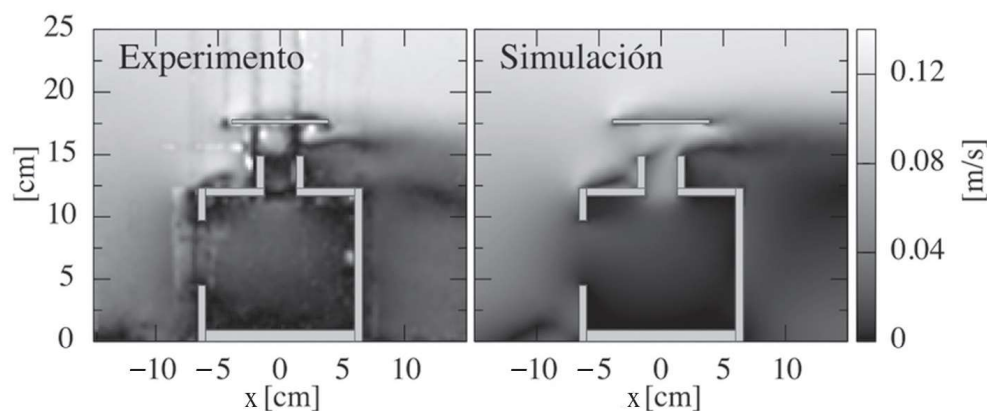


Figura 19. Comparación cualitativa de la magnitud de la velocidad en el plano central, caso de estudio A0, (izquierda) resultado experimental y (derecha) resultado de la simulación.

varía dependiendo de la configuración del intercambiador de viento, de ahí la importancia del diseño adecuado de este tipo de estructuras. Para lugares donde los vientos predominantes tienen una dirección fija y la habitación tiene una ventana orientada a barlovento, recomendamos construir un intercambiador sin divisiones, con dos aberturas opuestas y paralelas al viento (como el caso B90 de este estudio).

Además, realizamos simulaciones numéricas de todos los casos de IDV, mencionados con anterioridad, utilizando programas comerciales de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) como el COMSOL y el FLUENT. Los modelos numéricos reproducen la geometría del canal de agua y de la habitación con los diferentes IDV en el techo. Las simulaciones CFD resuelven las ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos en las tres dimensiones espaciales. Estas ecuaciones corresponden a leyes fundamentales de la física como son la conservación de masa y la conservación de cantidad de movimiento. Como en la mayoría de los flujos en edificaciones, éstos son turbulentos, por lo que se deben utilizar modelos que permitan simular la turbulencia sin utilizar demasiado tiempo de cómputo. En particular, para estas simulaciones utilizamos el modelo SST $k-\omega$ (Ramponi and Blocken, 2012). En el espacio de simulación se construyó una malla tetraédrica que utiliza 1,332,929 nodos. Como ejemplo (figura 19) muestra la comparación cualitativa entre la magnitud de la velocidad obtenida en el experimento y la obtenida en la simulación numérica del caso de estudio A0. Obtuvimos una diferencia máxima de 10% en la magnitud de la velocidad en todos los casos comparando los resultados de simulación con los experimentales (Castillo *et al.* 2014a). Este modelo numérico validado nos permitirá estudiar la ventilación que produce cada uno de los IDV en todo el volumen de la habitación, no sólo en el plano central, como estábamos limitados en los experimentos.

Ventilación por efectos térmicos en una habitación que tiene un techo frío y una fuente de calor

En el GEE también hemos realizado estudios sobre ventilación natural producida por efectos térmicos. Estudiamos el caso de la ventilación dentro de una habitación con un techo frío, una fuente de calor y una pequeña ventana. Se conoce como techo frío a un sistema de tubos con aletas colocado en la parte superior de una habitación. Por los tubos circula un fluido a menor temperatura que el aire al interior de la habitación. El techo frío es una estrategia de acondicionamiento para climas cálidos de bajo consumo de energía. La fuente de calor en este estudio puede ser una persona o algún equipo que genera calor como es una computadora o un electrodoméstico. La investigación se fundamentó como una aplicación de la dinámica de fluidos y la transferencia de calor para analizar la interacción dinámica de los cuatro flujos de aire que concurren en la habitación (figura 20). El primer flujo de aire es una columna térmica turbulenta –o pluma térmica ascendente– emergiendo desde una fuente de calor localizada en la parte central del piso de la habitación; el segundo flujo es un frente frío descendente originándose desde el lecho bajo del techo frío que produce un flujo llamado convección de Rayleigh-Bénard; el tercer flujo se produce como un flujo bidireccional a través de la ventana localizada en uno de los muros que produce la ventilación natural de la habitación; el cuarto flujo se produce a lo largo de las paredes originado por la transferencia de calor a través de las mismas. Estos cuatro flujos de aire se originan por efecto de flotación térmica, es decir, por la disminución o aumento de la densidad causado por calentamiento o enfriamiento del aire, respectivamente.

En este estudio realizamos experimentos utilizando la metodología de modelado de pequeña escala, para lo cual uti-

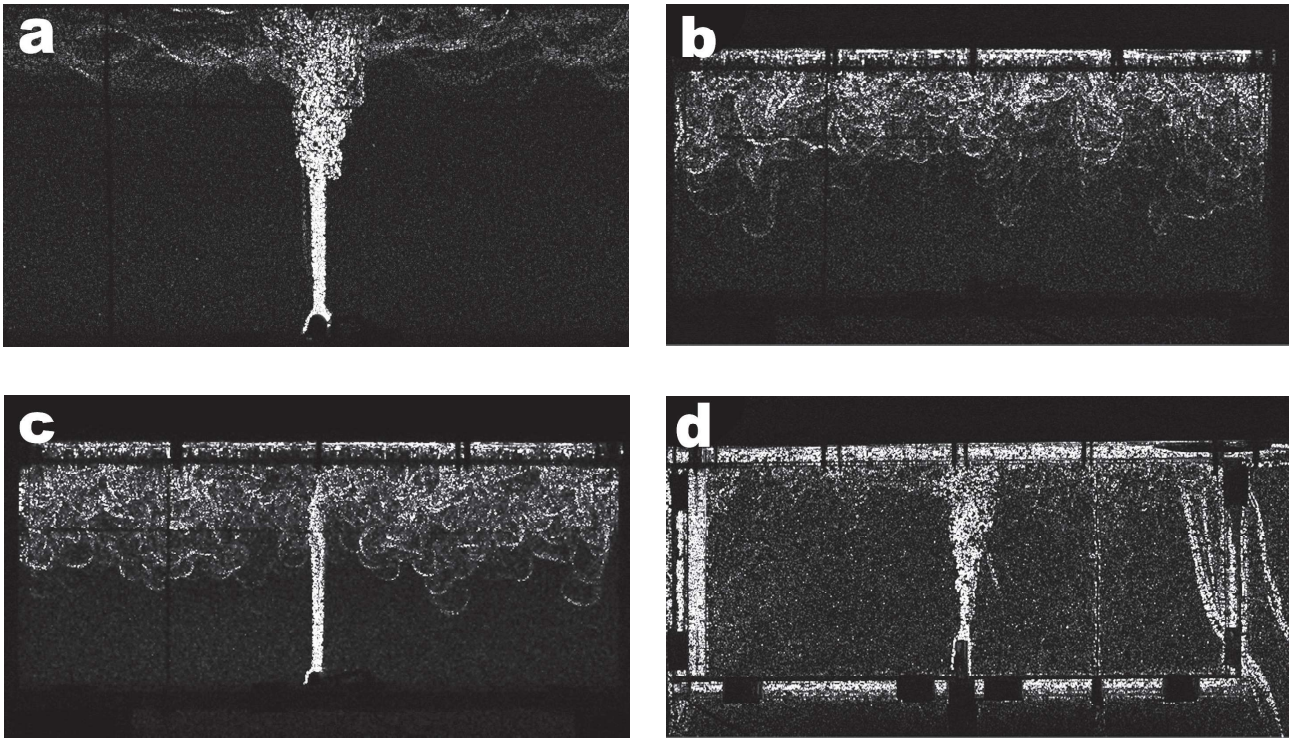


Figura 20. Imágenes obtenidas del schlieren sintético de los flujos concurrentes en el modelo de la habitación con fuente de calor interna, techo frío y ventilación. (a) Pluma térmica turbulenta, (b) convección de Rayleigh-Bénard, (c) pluma térmica y convección de Rayleigh-Bénard y (d) pluma térmica, convección de Rayleigh-Bénard y ventilación bidireccional.

lizamos un tanque rectangular de acrílico transparente de 30 l como modelo de laboratorio representando una habitación real a escala 1:10. El modelo lo sumergíamos en un tanque de acrílico de 1,700 l lleno de agua que representaba el ambiente. Como techo frío, colocamos en la parte superior del modelo un intercambiador de calor de placa de cobre enfriado con agua. En el piso colocamos un calefactor eléctrico cilíndrico como fuente de calor, que en la escala real equivale a un equipo de cómputo o a una persona realizando un trabajo ligero. La ventilación natural se produjo a través de una abertura del modelo ubicada en la parte inferior de una de las paredes. Para visualizar los flujos de fluido cálido o frío implementamos la técnica óptica denominada schlieren sintético; esta técnica está basada en la detección de la desviación de la trayectoria de la luz al pasar por un medio transparente de densidad no homogénea, lo que produce patrones de clarooscuro cuando se proyecta sobre una superficie. El ejemplo más citado de este efecto son los patrones que se observan sobre una carretera caliente. También se instalaron termopares para realizar mediciones de temperatura al interior del modelo.

Mediante una secuencia de experimentos de visualización identificamos los flujos arriba mencionados. Además, con las mediciones de temperatura logramos ajustar de

manera semiempírica los parámetros característicos del sistema experimental y, en consecuencia, pudimos validar un modelo teórico que propusimos para describir la transferencia de calor global del complejo sistema de flujos. Primero operamos (i) la fuente de calor en la habitación con la ventana cerrada y con un techo térmicamente aislado para reproducir el calentamiento transitorio descrito por el modelo de llenado de caja de Baines y Turner (1969), ver figura 20a. Para la transferencia de calor del estado cuasiestacionario usamos un modelo analítico que se ajustó con un coeficiente global de transferencia de calor (Castillo and Tovar, 2012). Asimismo hicimos experimentos operando (ii) sólo el techo frío, con ello se produjo un flujo llamado convección de Rayleigh-Bénard dependiente del tiempo en régimen turbulento, ver figura 20b. Calculamos la transferencia de calor mediante el modelo propuesto por Gladstone and Woods (2001). Después operamos (iii) la fuente de calor en combinación con el techo conductor de calor mantenido a la temperatura inicial del fluido, ver figura 20c. El desarrollo temporal del flujo para este caso tiene la misma dinámica que el flujo en el modelo del llenado de caja, pero desarrollando frentes térmico más débiles. El estado permanente, es decir, que ya no cambia en el tiempo, se alcanza cuando todo el calor suministrado por la pluma es absorbido por el

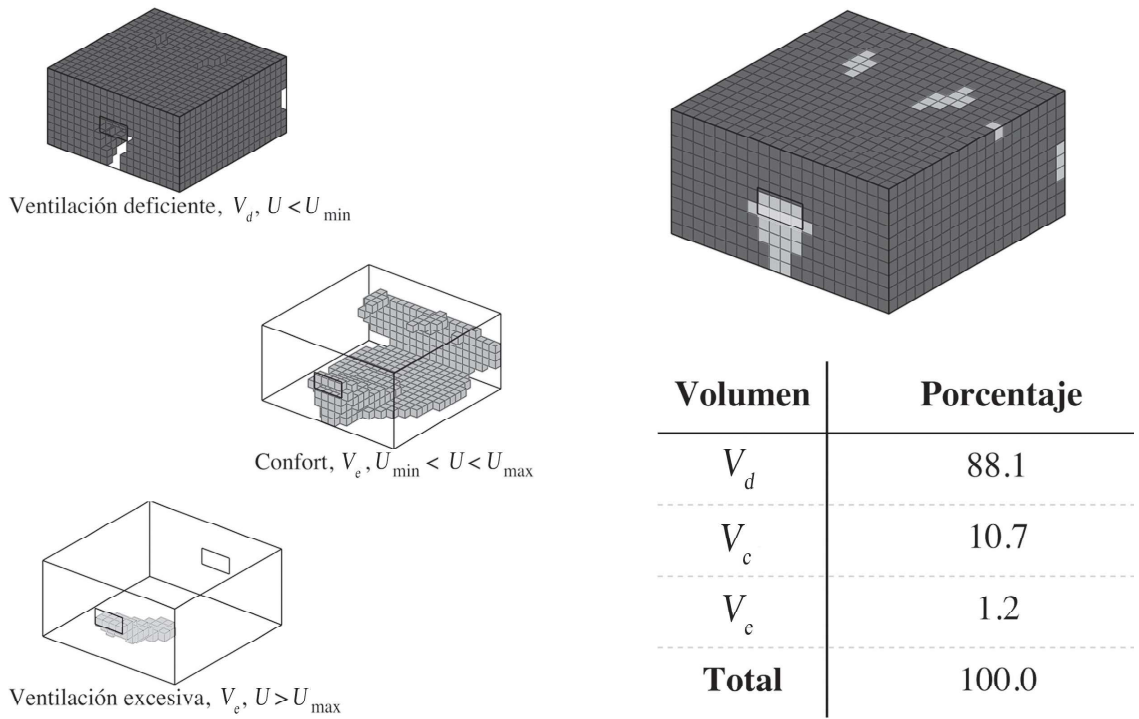


Figura 21. Evaluación del confort debido a la ventilación natural de una habitación con ventilación cruzada. El volumen interior está zonificado como: desconfort por ventilación deficiente, V_d , confort, V_c , y desconfort por exceso de ventilación, V_e . El rango $U_{\min} \leq U \leq U_{\max}$ se refiere al rango de velocidad del aire de confort.

techo conductor. En esta situación el suministro de energía se concentra en la pluma térmica turbulenta de la fuente y la extracción en una delgada región bajo el techo formada por pequeñas plumas turbulentas. La transferencia de calor para este caso se puede estimar análogamente a la convección de Rayleigh-Bénard entre dos placas paralelas (Thomas *et al.*, 2011). Luego realizamos los casos (iv) con la fuente de calor y la ventana abierta, así como (v) el techo frío y la ventana abierta. En estos casos detectamos que los cambios de régimen dependen de la ubicación de la ventana. Por último operamos el caso completo (vi), la fuente de calor, el techo frío y la ventana abierta para producir simultáneamente los tres flujos en adición a los flujos de capa límite que se forman en las paredes, ver figura 20d. Como resultado final de este estudio propusimos un modelo analítico general de transferencia de calor para los estados transitorio y permanente en donde cada uno de los términos adicionados representa el transporte de energía asociado a cada flujo. Mediante este modelo se encontró que el suministro de energía por la fuente interna y su extracción por el techo frío constituyen los dos principales mecanismos de transporte mientras que la ventilación y la convección y conducción por las paredes y el piso son secundarios (Thomas *et al.*, 2012).

Nuestro modelo analítico reproduce adecuadamente los resultados de los experimentos y puede ser extrapolado a

casos de escala real bajo ciertas suposiciones o idealizaciones. Si se ha de utilizar el modelo matemático en cálculos energéticos para edificios reales se deben incluir los valores de los parámetros característicos específicos de la habitación, que no son universales, tales como el coeficiente global de transferencia de calor, los coeficientes de la convección de Rayleigh-Bénard, el factor de descarga de la ventana o la constante de acreción de la pluma térmica.

Propuesta de una metodología para evaluar el confort térmico por ventilación

En la literatura es poco claro cómo evaluar el confort térmico que se produce por la ventilación natural, es por ello que decidimos incursionar en este campo de investigación. Hemos propuesto una metodología para evaluar el grado de confort térmico producido por la ventilación (Castillo *et al.*, 2014b). Primero hemos definido un índice llamado Índice de Balance Térmico (HBI) que estima el nivel de balance térmico que tiene el cuerpo humano en relación con la tasa de energía térmica liberada por el metabolismo del cuerpo. El balance térmico está dado por la suma de la ganancia de calor por metabolismo, la transferencia de calor al ambiente por radiación, por convección y por evaporación. Estas cantidades fueron calculadas utilizando los modelos propuestos por

investigadores que han estudiado estos aspectos de la fisiología humana (Ginovi, 1969). Con base en los resultados, consideramos que valor de HBI entre 20% y 20% representa una condición de confort térmico, mientras que un valor menor a 20% indica discomfort por frío y un valor mayor al 20% indica discomfort por calor (Castillo *et al.*, 2014b). Dadas unas condiciones de metabolismo y vestimenta de los ocupantes, temperatura y humedad relativa del aire, usando el HBI se puede calcular el rango de la magnitud de la velocidad del aire (U_{min} , U_{max}), para el cual los ocupantes se sienten en confort térmico. Con ello también se puede calcular el porcentaje de un espacio que se encuentra bien ventilado. En la figura 20 se puede observar un ejemplo de aplicación realizado mediante simulaciones numéricas que utilizan *software* de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de una habitación con ventilación cruzada (Kurabuchi *et al.*, 2004). Se consideró que los ocupantes estaban sentados con una vestimenta ligera. Las condiciones de temperatura, humedad relativa y viento corresponden a las condiciones climáticas de un día típico de verano a las 15 horas en Temixco, Morelos. Como podemos observar, el HBI es versátil, ya que nos permite evaluar el interior de cualquier edificación a escala real o de laboratorio con resultados experimentales o de simulaciones numéricas. Además se puede utilizar un amplio rango de temperatura, humedad relativa, velocidad de viento y actividad (metabólica) del ocupante.

Reflexiones finales

Consideramos que es indispensable que los temas de diseño bioclimático y eficiencia energética, con una visión integral, tomen relevancia a lo largo de la formación y del ejercicio profesional de los urbanistas, arquitectos, ingenieros arquitectos e ingenieros civiles. Por lo general la construcción de edificaciones con criterios bioclimáticos requiere de mayores inversiones, cuyo monto dependerá del clima y de las estrategias seleccionadas. Enfatizamos que diseñar una edificación con una visión bioclimática desde la gestación del proyecto es mucho más sencillo y económico que intervenirla cuando ya ha sido construida. Muchas de las estrategias de ventilación natural apropiadas para los clima de México se encuentran aplicadas y funcionando en la arquitectura vernácula mexicana. Los autores y participantes del GEE hemos realizado estudios de las diferentes estrategias de ventilación natural para conocer, explicar y mejorar las ya existentes e innovar al crear nuevos sistemas. Creemos en que deben trabajar en forma conjunta académicos, constructores y autoridades para realizar la transferencia de conocimiento y tecnológica, beneficiando así al usuario final ☺

Fuentes de consulta:

- American Agreement on Environmental Cooperation (AAEC) (2008). *Green Building in North America. Opportunities and Challenges*. Secretariat Report to Council Under Article 13 of The North American Agreement on Environmental Cooperation. Disponible en: http://www.cec.org/Storage/61/5388_GB_Report_SP.pdf.
- Baines W. D., Turner J. S. (1969). "Turbulent buoyant convection from a source in a confined region". *Journal of Fluid Mechanics*. (37) p. 51-80.
- Castillo J. A. y Tovar R. (2012). "Transient cooling of a room with a chilled ceiling". *Solar Energy*. (86) p. 1029-1036.
- Castillo J. A., Huelsz G. y Cruz M. V. (2014a). *Natural ventilation by windcatchers: CFD simulations and experiments*. CWE 2014, 6th International Symposium on Computational Wind Engineering, junio, 8-12 Hamburg, Alemania, p. 1-8.
- Castillo J. A., Huelsz G., van Hooff T. y Blocken B. (2014b). *Evaluation of the thermal comfort by natural ventilation in hot climates*. Proceedings of the 13th Conference of the Italian Association for Wind Engineering, IN-VENTO, 22-25 de junio 2014, Genova, Italia, p. 1-8.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE) (2009). *Tabla de consumo de electrodomésticos*; Disponible en: <http://www.cfe.gob.mx/casa/ahorroenergia/Paginas/Tabladeconsumo.aspx>.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de Energía (CONUEE) (2007). Disponible en: <http://www.conuee.gob.mx>.
- Cruz-Salas M.V., Castillo J.A., Huelsz G. (2014). *Experimental study on natural ventilation of a room with a windward window and different windexchangers*. *Energy and Buildings* (84), p. 458-465.
- Cheng Y., Niu J. y Gao N. (2012). *Thermal comfort models: A review and numerical investigation*. *Building and Environment* (47), p. 13-22.
- Givoni B. (1969). *Man, Climate and Architecture*. Elsevier Architectural Science Series, Elsevier, Amsterdam - London - New York.
- Gladstone C. y Woods A. W. (2001). "On buoyancy-driven natural ventilation of a room with a heated floor". *Journal Fluid Mechanics*: (441) p. 293-314.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2012). *Anuario de estadísticas por entidad federativa 2012*. Disponible en: http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/pais/aepef/2012/Aepef2012.pdf.
- International Energy Agency (IEA) (2011). *Technology Roadmap. Energy-efficient Buildings: Heating and Cooling Equipment*. Disponible en: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/buildings_roadmap-1.pdf.
- ISO 7730 (1994). *Moderate Thermal Environments-Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort*. International Organization for Standardization.

Datos de los y las autoras:

*Alumno y alumna del Doctorado en Ingeniería, Instituto de Energías Renovables, UNAM, México.
 jacat@ier.unam.mx / mvcs@ier.unam.mx

** Investigadora e investigador del Instituto de Energías Renovables, UNAM, México.
 ghl@ier.unam.mx / rto@ier.unam.mx