



PREDICCIÓN DE LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO TÉRMICO EN UN EDIFICIO CON DOBLE PARED

PREDICTION OF THERMAL IMPACT REDUCTION IN A DOUBLE WALL BUILDING

Marcelo Eduardo Berli^{1,*}, Agustín Brondino¹, José Di Paolo¹

Resumen

En la ciudad de Santa Fe de la Vera Cruz, Argentina, se está construyendo un edificio de altura que incluye elementos de arquitectura sustentable, eficiencia energética y confort logrado con la utilización de recursos naturales. Particularmente, un diseño de doble fachada en los frentes que dan al exterior para lograr una cámara de aire que impida la transferencia térmica desde el exterior al interior en verano y al revés en invierno. Este trabajo presenta un estudio numérico de la evaluación del desempeño térmico de la cavidad interpuesta en la doble fachada del edificio, para distintas condiciones climáticas, considerando dos alternativas de diseño: cámara de aire cerrada y cámara de aire conectada con el exterior. Ambos casos se comparan con la situación de inexistencia de la cámara, cuya transferencia de energía térmica se constituye en el caso patrón. Los resultados muestran que para las condiciones de verano, la cavidad con conexión al exterior sería la más recomendable, mientras que para el invierno, la cavidad cerrada es más apta para el ahorro de energía.

Palabras clave: acondicionamiento de ambientes, arquitectura sustentable, ahorro de energía, simulación computacional.

Abstract

In Santa Fe de la Vera Cruz city, Argentina, a building that includes elements of sustainable architecture, energy efficiency and comfort based on the use of natural resources is being built. Specifically, a double facade design on the front walls is meant to achieve an air chamber that prevents heat transfer from the outside to the inside in summer and vice versa in winter. In this work, a numerical study is presented for the evaluation of the thermal performance of a cavity (air chamber) interposed in a double facade of the building for different climatic conditions, considering two air chambers alternatives: connected and non connected to the outside. Both cases are energetically compared with the standard facade design without chamber. The results show that for summer conditions, a chamber connected to the outside would be the most efficient design, while for winter, the closed cavity is the best saving-energy alternative.

Keywords: computer simulation, energy saving, environment conditioning, sustainable architecture.

^{1,*}PID-UTN AMUTIFE 3457, Grupo de Investigación en Mecánica de los Fluidos, Universidad Tecnológica Nacional, Santa Fe – Argentina. Autor para correspondencia ✉: mberli@santafe-conicet.gob.ar,
 <https://orcid.org/0000-0001-9404-6787>, <https://orcid.org/0000-0001-5211-6396>
 <https://orcid.org/0000-0002-6964-1864>

Recibido: 14-05-2018, aprobado tras revisión: 18-06-2018

Forma sugerida de citación: Berli, M. E.; Brondino, A. y Di Paolo, J. (2018). «Predicción de la reducción del impacto térmico en un edificio con doble pared». INGENIUS. N.º 20, (julio-diciembre). pp. 39-47. DOI: <https://doi.org/10.17163/ings.n20.2018.04>.

1. Introducción

La mutual Jerárquicos Salud de la ciudad de Santa Fe de la Vera Cruz, Argentina, está construyendo un edificio administrativo de altura que incluye elementos de arquitectura sustentable, energéticamente eficiente y con un confort logrado en base a la utilización de la mayor cantidad de recursos naturales posibles (Figura 1-a). Para este fin, se diseñaron las caras externas este, oeste y sur del edificio con una doble fachada que lo recorre desde la planta baja hasta el último piso, que consiste en una pared externa y una interna de distinto material, separadas ambas por un espacio de aire de 50 cm de espesor, como se ve en el detalle de la Figura 1-b. De esta manera, se genera una cámara de aire que separa físicamente la fachada externa e interna y tiene el objetivo de lograr un aislamiento térmico entre el exterior y el interior del edificio. La cámara de aire de cada piso se comunica con las cámaras de los pisos superior e inferior mediante orificios de circulación realizados en la losa.

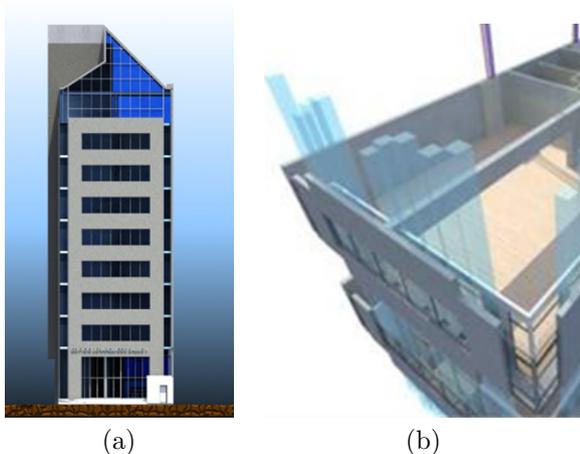


Figura 1. a) Esquema del edificio con doble fachada. b) Vista en corte y perspectiva de la doble fachada.

Debido a que las cámaras de aire de cada piso están interconectadas, existe la posibilidad de que pueda generarse un flujo de aire que recorra total o parcialmente la altura del edificio. Este flujo sería beneficioso desde el punto de vista térmico, sobre todo para las épocas estivales, ya que la circulación de aire se comporta como una barrera que reduce la transmisión de calor desde la cara externa hacia la interna y transporta una cantidad importante de energía térmica hacia el exterior del edificio, evitando su ingreso. La traducción en confort térmico y reducción del consumo energético en el interior es directa, pudiendo, además, regular con mayor eficacia las condiciones ambientales de los lugares de trabajo.

No obstante, los potenciales beneficios térmicos y energéticos del diseño actual, su efectivo funcionamiento y las posibles modificaciones ante el grado

de avance actual de la obra, para optimizar su comportamiento térmico, no son directamente predecibles, requiriéndose en esta etapa de herramientas predictivas experimentales y/o computacionales.

El abordaje del estudio experimental de las cámaras interconectadas de aire y su desempeño térmico requiere de una inversión en materiales, tiempo y recursos humanos elevados. Por otro lado, los estudios realizados mediante simulación computacional arrojan predicciones numéricas cuyos resultados permiten obtener inferencias que dirigen la experimentación hacia valores más certeros. Los resultados numéricos orientan al diseño y el éxito de su poder predictivo se basa no solo en su sustento en las leyes físicas, sino también en su capacidad para adaptarse a nuevas ideas y explorar un gran número de alternativas.

Este trabajo presenta el estudio numérico del desempeño térmico de una cavidad interpuesta en la doble fachada del edificio, a través de simulaciones computacionales para distintas condiciones climáticas, considerando dos alternativas de diseño: cámara de aire cerrada y cámara de aire con conexión con el aire exterior.

Los resultados muestran que para las condiciones de verano, el diseño de la cavidad implica una importante reducción en la energía térmica que ingresaría al edificio. Entre las alternativas analizadas, los diseños de la cavidad con conexión al exterior serían lo más recomendable en verano y la cámara cerrada sería la más apta para el invierno.

2. Materiales y métodos

El trabajo se constituye en una obra teórica computacional, basada en hipótesis acerca del fenómeno de transferencia térmica en la cámara de aire producida por la doble fachada. Estas consideraciones se resumen en flujo turbulento y transferencia térmica dominada por la convección [1-4] y se listan a continuación:

- 1) Estado estacionario debido a que las condiciones atmosféricas a que está expuesto el edificio varían muy lentamente durante un día, es aceptable esta aproximación para la cual se utilizarán las condiciones más exigentes de las estaciones verano e invierno.
- 2) La transferencia térmica entre los pisos se realiza solamente a través de los orificios de circulación, asumiendo que las losas son aislantes perfectos. Esto significa que al calcular la energía térmica que ingresa a cada piso la misma podrá provenir solamente desde las fuentes que se conecten con la cámara, esto es, desde el exterior y desde las cámaras de aire de los pisos contiguos.
- 3) No hay aporte de energía térmica por artefactos, personas, luminarias ni otra fuente. Esta sim-

plificación se realiza para estudiar solamente el ahorro de energía que implica la existencia de la cámara.

- 4) Se desprecia el aporte de energía térmica por radiación desde la pared externa hacia la interna.
- 5) El contenido de humedad del aire que circula por las cavidades es despreciable.
- 6) El flujo de aire en las cavidades se desarrolla en régimen turbulento. Debido a que no se desea tener información detallada de la capa límite en el contacto entre las paredes y el aire, se utilizó un modelo de turbulencia del tipo $k-\epsilon$, aplicado en un *software* de simulación avanzado.
- 7) Las paredes internas y externas se asumen lisas.

2.1. Definición del sector donde se realizarán las simulaciones

Como se ha mencionado en la introducción, este trabajo consiste en el estudio de un modelo físico representativo de la cavidad cuyo desempeño térmico desea ser estudiado. Como es sabido, la disponibilidad de herramientas informáticas de alta capacidad de cómputo facilita la solución de problemas complejos como el abordado en este trabajo. No obstante, al ser limitada la disponibilidad de recursos, el tamaño del problema en estudio debe reducirse de forma tal que pueda resolverse y que al mismo tiempo la porción estudiada sea representativa del problema completo. En el caso de la cavidad en estudio, la simulación del problema en la totalidad de sus dimensiones es computacionalmente muy costosa. Por tal motivo, es posible seccionar el problema en una porción cuyas dimensiones contengan todas las características geométricas que condicionan el flujo del aire en la cámara, de manera que el comportamiento del resto de la cavidad pueda considerarse como una repetición de la porción estudiada. La selección de dicha porción puede observarse en la Figura 2-a (prisma transparente de aristas anaranjadas). El prisma que delimita la zona seleccionada consta de una porción de la cámara correspondiente a un piso cualquiera del edificio. Si tomásemos una fotografía de una vista superior de dicha cámara, tendríamos una imagen como la mostrada en el recuadro naranja de la Figura 2-b, donde puede observarse la presencia del orificio de circulación realizado en la losa del piso correspondiente y que conecta la cámara de aire con la del piso anterior.

Observando la Figura 2-b puede notarse que la sección rectangular contigua (recuadro en azul) y la seleccionada (recuadro en naranja) están dispuestas en espejo. Desde el punto de vista físico, este hecho implica una simetría en la geometría, indicando que la solución del problema en la sección de recuadro

anaranjado es la misma que en su contigua (recuadro azul), pero espejada. Matemáticamente hablando, esto quiere decir que las derivadas de las variables involucradas, respecto a la dirección horizontal son nulas. Luego, el esquema de los dos orificios de la Figura 2-b se repite en las mismas posiciones de cada losa que divide dos pisos contiguos.

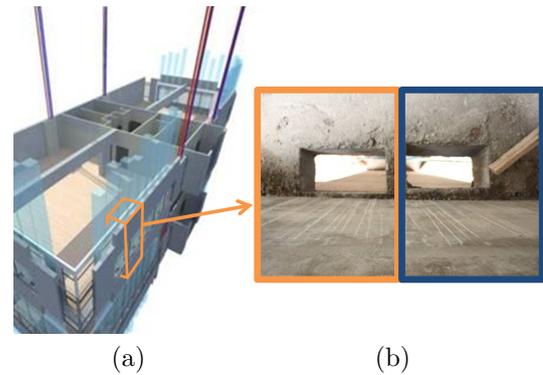


Figura 2. a) Porción seleccionada para la simulación. b) Orificios de circulación realizados en la losa.

Como existe un esquema repetido, es aceptable resolver el problema en la porción considerada con recursos computacionales estándares. Si a esta selección se le adicionan las porciones de pared interior y exterior, entre las cuales se ubica la cámara de aire, y los orificios en las losas, se llega a la definición de un módulo de simulación, el cual puede verse en la Figura 3. Las dimensiones y materiales de cada módulo son los siguientes:

- Pared externa: construida de concreto, con 20 cm de espesor, 3,45 m de altura y 70 cm de ancho.
- Pared interna: construida de concreto de 7 cm de espesor y las demás dimensiones iguales que la pared externa.
- Cámara de aire: 50 cm de espesor y demás dimensiones iguales a la pared exterior.
- Orificios: 20 cm x 40 cm de sección horizontal y un espesor (en la losa) de 25 cm.

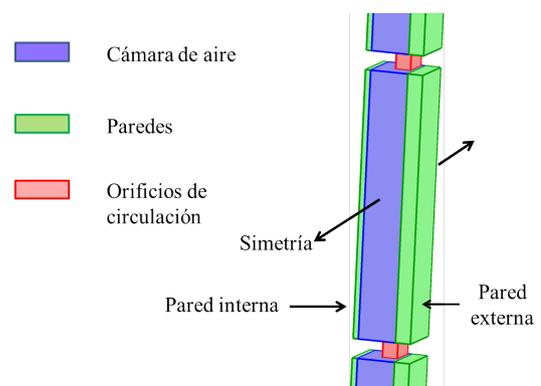


Figura 3. Esquema geométrico del módulo de simulación.

La sumatoria de todos los módulos a través de los orificios de circulación, definirán la geometría total para la simulación del problema a resolver. Es decir, 8 módulos como el de la Figura 3, interconectados por los orificios de circulación.

2.2. Modelo en ecuaciones y metodología de resolución

El movimiento del aire dentro de la cavidad se debe principalmente a fuerzas de flotación, asociadas a los gradientes de densidad que se originan por la diferencia de temperaturas entre las paredes que generan la cavidad. Este fenómeno se conoce como convección natural y su dinámica ha sido descrita en trabajos anteriores mediante la aproximación de Boussinesq. Esta aproximación considera la variación de la densidad únicamente en las fuerzas volumétricas, mediante una función lineal con el cambio de temperatura y con validez para flujo laminar incompresible y bajos gradientes térmicos.

En la cavidad simulada, los gradientes térmicos suelen ser superiores a los límites de validez de la aproximación de Boussinesq [5]. Por ello, a los fines de avanzar hacia simulaciones más realistas, en este trabajo se utiliza un modelo de flujo compresible, asumiendo flujo turbulento en estado estacionario y despreciando los efectos de la radiación en la transferencia de energía. De esta manera, las ecuaciones diferenciales que describen el flujo de convección natural son las siguientes:

Continuidad

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

Cantidad de movimiento

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot \left[-P \mathbf{I} + (\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_T)(\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} - \frac{2}{3} \rho k \mathbf{I} \right] + (\rho - \rho_0) \mathbf{g} \quad (2)$$

Energía

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_A \nabla T) \quad (3)$$

Donde \mathbf{u} es el vector velocidad, ρ es la densidad del aire, ρ_0 es la densidad del aire a la temperatura ambiente (externa), P es la presión modificada, g es la aceleración de la gravedad, μ la viscosidad del aire, μ_T la viscosidad turbulenta, k la energía cinética turbulenta, C_p la capacidad calorífica del aire, k_A la conductividad térmica del aire y T la temperatura.

Para describir el flujo turbulento se utilizó el modelo de k- ϵ , que se ha demostrado es el más preciso

para el cálculo del movimiento de aire dentro de habitaciones en viviendas y edificios [6]. No obstante, debe destacarse que dicha precisión disminuye muy cerca de las paredes, donde modelos como el k- ϵ de bajo número de Reynolds prometen una mejor descripción de los perfiles de velocidad y temperatura [7]. Sin embargo, este estudio se orienta a mostrar las bondades generales del sistema y no una predicción exacta de los valores que se calculan cerca de las paredes, en cuyo caso la descripción del modelo k- ϵ es muy útil para una primera estimación y permite obtener resultados con mucho menos costo computacional y más rápidamente, siendo lo último deseable en estudios requeridos para la toma de decisiones de las empresas constructoras. Así, además de las ecuaciones de conservación se suman: la ecuación (4) de la variación de energía cinética turbulenta y la ecuación (5) de la velocidad de disipación turbulenta:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \epsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \left(\mu_T \cdot \left[\nabla \mathbf{u} : (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}^2) \right] - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \mathbf{u} \right) - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

La viscosidad turbulenta μ_T se define por la Ecuación (6).

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

Los parámetros de las ecuaciones (4) a (6) se consideran constantes, con los siguientes valores [5]:

$$\begin{aligned} C_{\epsilon 1} &= 1,44 \\ C_{\epsilon 2} &= 1,92 \\ C_\mu &= 0,09 \\ \sigma_k &= 1 \\ \sigma_\epsilon &= 1,3 \end{aligned}$$

2.2.1. Condiciones de contorno

El modelo de flujo turbulento k- ϵ empleado, no resuelve el perfil de velocidades contra la pared sólida sino que utiliza funciones de pared que modelan los altos gradientes de velocidad y temperatura que se producen en esa zona. Para ello, además de la condición de impermeabilidad de la pared definida por la Ecuación (7) y del flujo de energía cinética nulo, definido por la Ecuación (8), se utilizó la Ecuación (9) que utiliza una función de pared:

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (7)$$

$$\nabla k \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (8)$$

$$\left[(\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_T)(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} - \frac{2}{3}\rho k \mathbf{I} \right] \mathbf{n} = -\rho \frac{u_\tau}{\delta_w^+} \mathbf{u}_{tang} \quad (9)$$

Con

$$\epsilon = \rho \frac{C_\mu k^2}{K_v \delta_w^+ \mu}$$

Donde \mathbf{u}_{tang} es la velocidad tangencial, definida como $\mathbf{u}_{tang} = \mathbf{u} - (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n}$, u_{tau} la velocidad de fricción, K_v es la constante de Von Kármán y δ_w^+ es el espesor adimensional de la función de pared. Además, en los orificios de entrada y salida se asumió tensión normal igual a cero, $\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{u}$, y la presión en la entrada inferior se definió arbitrariamente igual a 0.

Para el análisis térmico se consideraron constantes en cada simulación, las temperaturas de las paredes que delimitan la cavidad, así como condiciones de simetría en los cortes que se ven en la Figura 3. La temperatura del aire que ingresa a la cavidad también se supone constante e igual a la temperatura del ambiente (T_a).

Las ecuaciones diferenciales presentadas y sus correspondientes condiciones de contorno se resuelven de forma numérica mediante el método de los elementos finitos utilizando el *software* comercial con licencia, COMSOL 4.4.

2.2.2. Verificación del régimen de flujo

Trabajos anteriores [1–4, 8, 9] han abordado el análisis del fenómeno de convección natural en cavidades representativas con aire (techos entre otros) mediante modelos de flujo laminar. No obstante, debido a las dimensiones de las cavidades en este trabajo y las propiedades del aire, es razonable esperar que en condiciones normales el flujo pueda ser turbulento, lo cual fue necesario corroborar previo a la selección del modelo. Con este fin, se utilizaron como parámetros adimensionales el número de Reynolds y el de Grashof, los cuales fueron estimados utilizando las propiedades físicas del aire seco presentadas en la Tabla 1. Estas propiedades se adoptaron para presión atmosférica normal (10^5 Pa) y 30 °C [10], correspondiente a la temperatura ambiente (de referencia) utilizada en el modelo.

Tabla 1. Propiedades físicas de aire seco a 30 °C y presión atmosférica

Descripción	Valor
Densidad (ρ)	1,205 [kg/m ³]
Viscosidad (μ)	1,82e-5 [N s/m ³]
Conductividad térmica (k_A)	0,0257 [W/(m K)]
Capacidad calorífica (C_p)	1,005 [kJ/(kg K)]
Coefficiente de expansión térmica (β)	3,43e-3 [1/K]

El número de Reynolds compara la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas y se define por la relación $Re = \rho U_c L / \mu$, siendo U_c y L la velocidad y longitud características del modelo. Por otro lado, el número de Grashof indica la relación entre las fuerzas de flotación y las fuerzas viscosas y se define por la relación $Gr = \rho^2 g \beta \Delta T L^3 / \mu^2$, siendo ΔT la diferencia de temperatura característica del sistema en estudio. Cuando las fuerzas de flotación son grandes comparadas con las viscosas el régimen se considera turbulento. La transición entre estos dos regímenes para placas verticales se da para un Gr del orden de 10^9 [10].

Si se definen como parámetros característicos, la velocidad de flujo de flotación $U_c = (g \beta \Delta T L)^{1/2}$, la longitud $L = 3m$ igual a la altura de cada cámara entre dos pisos contiguos y la diferencia de temperatura entre las paredes de la doble fachada, $\Delta T = 56$ °C, los valores resultantes de $Re \approx 10^6$ y $Gr \approx 10^{11}$, indican claramente la existencia de un régimen turbulento o de transición, pero no laminar. Luego, los resultados que se presentan en la siguiente sección se corresponden a un flujo de aire dentro de la cavidad que se encuentra en régimen turbulento para todas las condiciones simuladas.

3. Resultados y discusión

La primera condición exigente a estudiar responde a las condiciones extremas en verano. La parte de pared externa en contacto con el exterior tiene una temperatura de 70 °C, suponiendo a la misma expuesta a la incidencia del sol en las horas de máxima temperatura. Por otro lado, la parte de la pared interna en contacto con el interior del edificio, tiene una temperatura para la cual se considera un ambiente de trabajo agradable, esto es, 24 °C. Como el objetivo es estudiar el desempeño térmico de la cavidad, es razonable considerar primero la situación de ausencia de cavidad asumiendo las paredes externa e interna en contacto directo, suprimiendo también los orificios de circulación. Cabe aclarar que para el caso de ausencia de cavidad se conservan ambas paredes y no solamente la externa,

ya que de contar solo con esta última los posteriores resultados se modificarían no solamente por la inclusión de la cavidad sino también por el agregado de otra pared, en cuyo caso el análisis no podría focalizarse solamente en la existencia o ausencia de la cavidad.

3.1. Situación testigo: ausencia de cavidad

La Figura 4 muestra un esquema de las condiciones en que se realizó la simulación.

Debido a que no existen los orificios de circulación, la consideración 2) del inciso 2 permite el cálculo de la transferencia de energía térmica de un módulo en forma independiente de los demás. Ante esta situación, en cada módulo se ha calculado un ingreso de energía térmica de 204 W/m^2 , valor que será utilizado en los siguientes casos. Cabe aclararse que, a diferencia de los casos venideros, el único mecanismo de transmisión térmica es el de conducción, motivo por el cual se puede comprobar el valor obtenido utilizando la ley de Fourier.

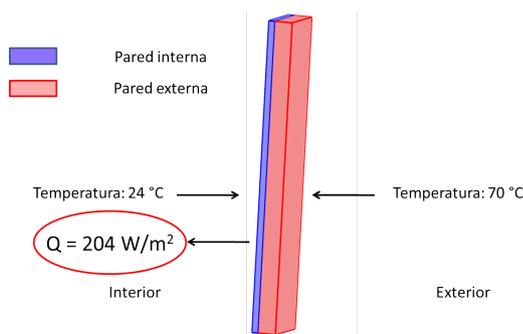


Figura 4. Condiciones de simulación y energía térmica para ausencia de cavidad.

3.2. Cavidad sin conexión con el exterior

El segundo caso analizado consiste en la cámara de aire, pero sin conexión con el exterior. Esto es, si bien las cámaras de todos los pisos están interconectadas mediante los orificios, ninguna de las cámaras tiene alguna abertura que la conecte con el ambiente externo al edificio. El aire quedará así atrapado en las cámaras y solo puede haber circulación a través de los orificios. La diferencia de temperatura entre las paredes externas e internas genera variaciones en la densidad del aire y por ende convección natural [8,9] como muestra la Figura 5.

Puede observarse que el aire en contacto con la pared más caliente (en rojo) asciende y aumenta su temperatura (las zonas en verde implican mayor temperatura que las celestes), mientras que en las cercanías de la pared fría (en azul) el aire desciende y va cediendo su temperatura. De esta forma, se produce un movimiento del aire por el fenómeno físico de convección natural, mediante el cual el aire transmite energía

térmica no solamente por conducción, sino también por efecto convectivo.

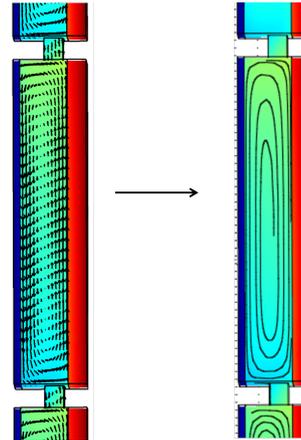


Figura 5. Vista lateral de un módulo mostrando la circulación del aire. Izquierda: vectores de velocidad. Derecha: líneas de corriente.

Al cuantificar el calor transmitido para este esquema, surge que el mismo es 51 W/m^2 , es decir, que la reducción de la energía térmica que ingresaría desde el exterior es del 75 % respecto a los valores del inciso 3.1.

Ante este resultado puede cuestionarse si es razonable la reducción obtenida. Para poder responder esta incógnita, puede suponerse el caso de que el aire atrapado en la cámara estuviera estancado sin efectuar los movimientos de recirculación, en cuyo caso la energía transferida al interior sería de $2,3 \text{ W/m}^2$ (cálculo que también puede realizarse con la ley de Fourier), implicando una reducción del 99 %. Estos valores concuerdan con el hecho de que el aire es un mal conductor del calor, teniendo un coeficiente de transmisión térmica de $0,025 \text{ (W/mK)}$ en comparación, por ejemplo, con el concreto cuyo coeficiente es de $1,5 \text{ (W/mK)}$, 60 veces superior que el del aire. El hecho de que la reducción sea del 75 % y no del 99 % es porque el movimiento del aire transfiere calor adicional por convección.

Cabe aclarar que al carecer de conexión con el exterior, pudo constatarse que el aire recircula dentro de un módulo y, por lo tanto, no hay flujo a través de los orificios de circulación, no existiendo transferencia de energía entre los módulos. Esto deriva en que el flujo de energía térmica hacia el interior es idéntico en cada módulo. Claro está que esta es una situación idealizada en la cual todos los pisos están a una misma temperatura interna y en consecuencia no existen diferencias de temperaturas que pudieran ocasionar un movimiento convectivo entre los pisos.

Este resultado indica que la sola existencia de la cámara de aire podrá impactar en un ahorro significativo de energía para mantener un ambiente interno agradable.

3.3. Cavidad con conexión con el exterior y flujo natural

Para simular la conexión de las cámaras con el exterior, se suponen orificios de dimensiones similares que los orificios de circulación en las paredes externas de los módulos del primer y último piso. Esto es, orificios de sección de 20 cm por 40 cm y el espesor de la pared exterior (20 cm). Para el primer piso, se diseñó el orificio en la parte lateral inferior del primer módulo, como muestra la Figura 6-a, mientras que para módulo 8 el orificio se realizó en la parte lateral superior, como muestra la Figura 6-b.

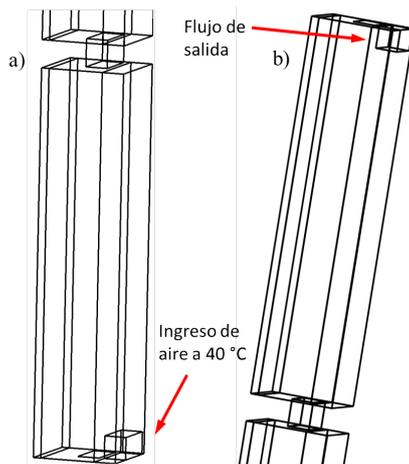


Figura 6. a) Orificio que conecta el módulo inferior con el exterior. b) Orificio que conecta el módulo superior con el exterior.

Para realizar la simulación, se consideraron las mismas condiciones que para el caso 3.2, pero como en este caso puede haber ingreso de aire desde el exterior, se supone que el mismo se encuentra a una temperatura elevada de verano de 40 °C. Las condiciones de entrada y salida en el primer y último módulo respectivamente, se indican en la Figura 6, mientras que para los restantes módulos se mantienen las temperaturas externa e interna.

La presencia de las conexiones con el exterior hace posible un flujo que recorra todos los pisos desde el primer módulo hasta el último. En efecto, los resultados indican la existencia de este flujo, como se ve en la Figura 7. Allí puede verse, en una vista lateral del lado más alejado del orificio de circulación, que el aire mantiene cierta recirculación conduciendo a efectos similares al caso 3.2, pero la vista lateral cercana al orificio muestra la existencia de un flujo que atraviesa la cavidad desde el módulo inferior hasta el superior. Esta circulación permitiría ventilar la cavidad para evitar el posible estancamiento de humedad y la generación de malos olores.

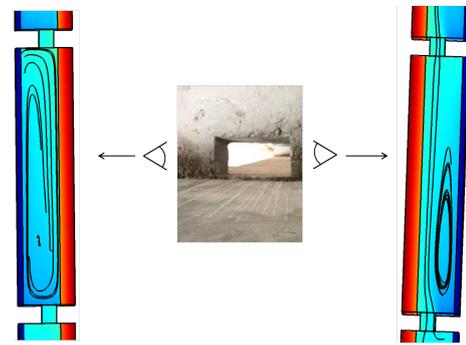


Figura 7. Esquemas de circulación por convección natural en las cavidades.

En cuanto al ahorro energético, la existencia de una circulación entre los módulos modifica la *performance* individual de cada uno. Los módulos inferiores están beneficiados ya que el flujo de aire desde el exterior absorbe cierta cantidad de energía térmica de la pared más caliente y la transporta por convección hacia un módulo superior, de forma tal que los módulos, cuanto más arriba se ubiquen, reciben mayor cantidad de energía que el aire fue absorbiendo desde los módulos inferiores.

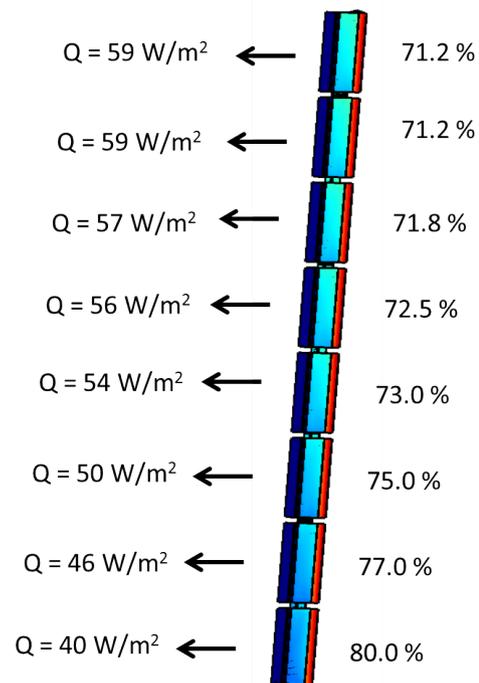


Figura 8. Desempeño térmico de los 8 módulos. Los porcentajes indican la reducción en la transferencia de calor de cada piso respecto de la situación sin cámara de aire.

En la Figura 8 se presentan las transferencias de energía térmica y los porcentajes de reducción para cada módulo respecto al caso 3.1. Puede observarse que los primeros tres módulos tienen un desempeño térmico igual o superior que en el caso 3.2, pero luego,

el ahorro disminuye. Globalmente, el promedio de reducción entre los 8 módulos es del 74 %, muy similar al caso anterior. Además, estos resultados pueden ser de utilidad en el momento de diagramar la ocupación de cada piso.

4. Simulaciones para condiciones de invierno

La presencia de la cavidad muestra, según los resultados numéricos de este estudio, un muy buen desempeño térmico en condiciones de verano, pero resta aún conocer su comportamiento en condiciones representativas de un día de invierno. Para este objetivo, se modificaron las temperaturas de la pared externa y del aire que, en el caso de la cavidad con conexión al exterior, entraría desde el exterior. Debe mencionarse que para las condiciones de invierno, la energía fluye hacia el exterior, ya que la situación se invierte respecto al verano. Además, se mantiene la geometría patrón que surge de sustraer la cavidad para tener una referencia de comparación. Las condiciones de contorno son las siguientes:

Temperatura de la pared interna: 24 °C.

Temperatura de la pared externa: 10 °C.

Temperatura del aire ambiental: 10 °C.

Esta condición implicaría una pobre incidencia del sol sobre la pared externa y por ello la misma se mantiene a la misma temperatura que el aire exterior.

Para la cavidad con conexión al exterior y flujo natural, los resultados esquematizados en la Figura 9, muestran que la reducción en las pérdidas de energía desde el interior hacia la atmósfera es del 63 %. Si bien es un valor aceptable, la circulación de aire a menor temperatura en contacto con la pared interior implica una absorción de energía térmica desde el interior. Ante este hecho físico, se analizó el caso de cavidad cerrada, cuyos resultados se esquematizan en la Figura 10. El ahorro obtenido para este segundo caso es del 85 %, significativamente superior al anterior. Es por lo tanto recomendable que ante condiciones de invierno, no exista circulación entre las cavidades y el exterior.

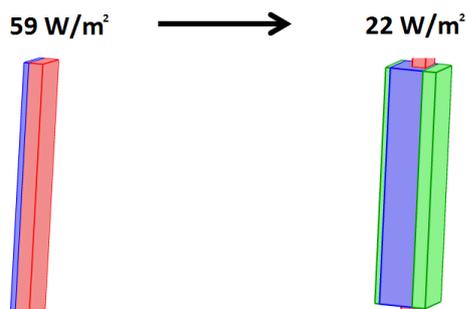


Figura 9. Comparación entre ausencia de cavidad y cavidad con ventilación natural.

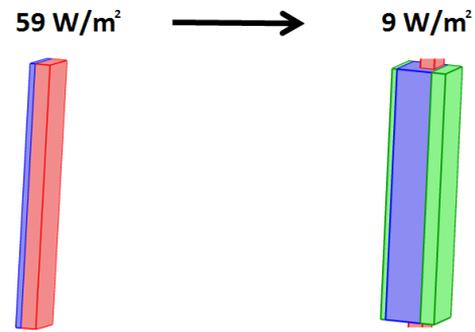


Figura 10. Comparación entre ausencia de cavidad y cavidad cerrada.

5. Conclusiones

Se ha realizado el estudio numérico del desempeño térmico de una cavidad interpuesta en la doble fachada diseñada para el edificio de altura de la mutual Jerárquicos Salud de la ciudad de Santa Fe de la Vera Cruz, Argentina. El análisis se realizó en base a simulaciones computacionales de distintas condiciones climáticas y se consideraron dos alternativas de diseño de acuerdo con el esquema proporcionado: cavidad cerrada y con conexión con el exterior.

Los resultados muestran que, para las condiciones de verano, el diseño de la cavidad implica una importante reducción en la energía térmica que ingresaría al edificio. Tanto la cavidad cerrada como la conectada con el exterior, son alternativas válidas que mostraron aptitudes térmicas para la reducción de la energía transferida, estimando en verano una reducción que rondaría el 75 % respecto a un diseño sin la cavidad. No obstante, el caso de la cavidad conectada al exterior, debido a la ventilación natural, sería el seleccionado debido a que cuenta con la posibilidad de renovar el aire atrapado en las cavidades, reduciendo la posibilidad de acumular humedad y malos olores.

No obstante, las prometedoras predicciones de la cavidad con ventilación natural para el verano, los resultados han mostrado que su desempeño térmico en invierno es inferior al caso de la cavidad cerrada. Para el caso de ventilación natural, en invierno se ha estimado una reducción en la energía térmica perdida hacia el exterior del 63 %, mientras que para el diseño de cavidad cerrada, esta reducción sería del 85 %.

La conclusión final de este estudio basado en predicciones computacionales, es que se sugiere realizar los orificios de circulación con un sistema de control del flujo de aire, que permita mantener abiertos los orificios durante los días de temperaturas más elevadas y cerrarlos durante los períodos de temperaturas más bajas. Futuros trabajos con modelos predictivos más exactos cerca de las paredes permitirán ajustar más precisamente las predicciones de este estudio en cuanto a los valores calculados, mientras que estos resultados

pueden utilizarse conceptualmente ya que se estima que la precisión de los cálculos de transferencia de calor no modificarán las tendencias mostradas en este trabajo.

Finalmente, se destaca que de acuerdo con todos los estudios numéricos realizados, la sola presencia de la cámara de aire muestra una notable mejora del desempeño térmico en cuanto a las transferencias de energía entre la atmósfera y el interior del edificio, siendo la sugerencia del párrafo anterior la que ha mostrado las situaciones de mejor rendimiento.

Referencias

- [1] J. Hirunlabh, S. Wachirapuwadon, N. Pratinthong, and J. Khedari, “New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation,” *Building and Environment*, vol. 36, no. 3, pp. 383–391, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00016-0](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00016-0).
- [2] M. Ciampi, F. Leccese, and G. Tuoni, “Energy analysis of ventilated and microventilated roofs,” *Solar Energy*, vol. 79, no. 2, pp. 183–192, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.08.014>.
- [3] H. Asan and L. Namli, “Laminar natural convection in a pitched roof of triangular cross-section: summer day boundary conditions,” *Energy and Buildings*, vol. 33, no. 1, pp. 69–73, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00066-9).
- [4] H. F. Oztop, Y. Varol, and A. Koca, “Laminar natural convection heat transfer in a shed roof with or without eave for summer season,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, no. 13, pp. 2252–2265, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.01.018>.
- [5] A. Brondino, M. E. Berli, and J. Di Paolo, “Aislación térmica producida por cavidades de aire. análisis de un techo con geometría simplificada y flujo turbulento,” in *V Congreso Argentino de Ingeniería Química, Santiago del Estero, Argentina.*, 2016. [Online]. Available: <https://goo.gl/2bVmLv>
- [6] C. Ghiaus, F. Allard, M. Santamouris, C. Georgakis, and F. Nicol, “Urban environment influence on natural ventilation potential,” *Building and Environment*, vol. 41, no. 4, pp. 395–406, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.02.003>.
- [7] S. Wang, Z. Shen, and L. Gu, “Numerical simulation of buoyancy-driven turbulent ventilation in attic space under winter conditions,” *Energy and Buildings*, vol. 47, pp. 360–368, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.012>.
- [8] M. E. Berli, J. Di Paolo, and F. A. Saita, “Mecánica de fluidos computacional aplicada al diseño térmico pasivo de techos,” in *I Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, Bahía Blanca, Argentina*, 2008.
- [9] —, “Heat transfer on a naturally cross-driven ventilated triangular cavity with openings,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 166, no. 1, pp. 1–10, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/166/1/012019>. [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/1742-6596/166/i=1/a=012019>
- [10] A. Bejan, *Convection Heat Transfer, Fourth Edition*, I. John Wiley & Sons, Ed., 2013. DOI: <http://doi.org/10.1002/9781118671627>.