

Hacia una herramienta basada en la nube para simular la ventilación natural en edificios: predicción de los coeficientes de presión.

Towards a cloud-based tool to simulate the natural ventilation in buildings: prediction of the pressure coefficients.

Facundo Bre

Filiación: CIMEC (UNL/CONICET)

Dirección: Predio Dr. Alberto Cassano", Colectora Ruta Nacional 168 s/n, 3000, Santa Fe, Argentina

Correo: facubre@cimec.santafe-conicet.gov.ar

Juan M. Gimenez

Filiación: CIMEC (UNL/CONICET)

Dirección: Predio Dr. Alberto Cassano", Colectora Ruta Nacional 168 s/n, 3000, Santa Fe, Argentina

Correo: jgimenez@cimec.santafe-conicet.gov.ar

Código del manuscrito: 04_001

Fecha de aceptación: 04/10/2019

Resumen

El objetivo de este trabajo es presentar una nueva herramienta basada en la nube para simular la ventilación natural en edificios. En particular, en este documento se desarrolla una herramienta automática de simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD) para predecir los coeficientes de presión promedio en la superficie ($\overline{C_p}$) para, luego, utilizar estos datos en modelos de ventilación natural. La interfaz de usuario desarrollada toma como entradas la geometría del edificio y el entorno urbano a través de un archivo .STL o .IDF (EnergyPlus) y el conjunto de los ángulos de incidencia de viento requeridos. Teniendo en cuenta estas entradas, se lleva a cabo un proceso automático de generación de la geometría y la malla, y se impone y simula una configuración de CFD previamente calibrada. Los resultados se procesan posteriormente y se devuelven al usuario los datos de $\overline{C_p}$ por ángulo del viento por superficie del edificio analizado. La salida puede ser un texto simple o el archivo .IDF actualizado listo para ejecutar la simulación de EnergyPlus. El desarrollo realizado permite a diseñadores solicitar un ensayo en un túnel de viento virtual, accediendo a una herramienta de avanzada con pocos parámetros de entrada, y sin la necesidad de conocimiento técnico específico ni inversión en recursos computacionales.

Palabras claves: Ventilación natural; Coeficiente de presión; Dinámica de fluidos computacional; Herramienta de simulación basada en la nube

Abstract

The aim of this work is to introduce a new cloud-based tool to simulate natural ventilation in buildings. Particularly in this paper, an automatic Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation tool is developed to predict the surface-average pressure coefficients ($\overline{C_p}$) to, then, use these data in natural ventilation modeling. The user interface developed takes as the inputs the geometry of the building and urban surrounding through a .STL or .IDF (EnergyPlus) file and the set of the wind incidence angle required. Taking into account these inputs, an automatic geometric generation and meshing process is carried out, and a previously calibrated CFD configuration is imposed and simulated. Results are post-processed returning to the user the ($\overline{C_p}$) data per wind angle per surface of the analyzed building. The output can be a plain text or the updated .IDF file ready to run the EnergyPlus simulation. The development carried out allows designers asking for an essay in a virtual wind tunnel, and access to an advanced tool with few input parameters without neither specific technical knowledge nor investment in computational resources.

Keywords: Natural ventilation; Pressure coefficient; Computational fluid dynamics; cloud-based simulation tool.

Introducción

La ventilación natural (VN) ha demostrado ser una estrategia pasiva con gran potencial para ahorrar energía y mejorar el confort térmico en edificios para diferentes lugares alrededor del mundo (Oropeza-Perez & Østergaard, 2014; Sorgato et al., 2016). De igual manera, en la ciudad de Buenos Aires (Argentina), un gran potencial de 4514 horas de VN fue determinado por Chen et al. (2017). Más allá de la reducción relevante del consumo de energía, la VN también mejora la calidad de vida de los ocupantes. Por ejemplo, se ha demostrado que la afección médica en las personas que trabajan o viven en edificios con aire acondicionado, conocida como el síndrome del edificio enfermo, es más frecuente que en las personas que viven o trabajan en edificios con ventilación natural (Seppänen & Fisk, 2002). Por otro lado, el rango aceptación de confort térmico para edificios con ventilación natural es mayor que para los edificios con sistemas de climatización mecánica estándar (de Dear & Brager, 2002).

En el diseño de edificios, para tener en cuenta el efecto de la VN en el desempeño termo-energético del mismo, es necesario cuantificar las tasas de ventilación impulsadas naturalmente. Esta tarea requiere un conocimiento profundo y una predicción precisa y acoplada del flujo de aire y la transferencia de calor, siendo la simulación computacional la principal herramienta para este fin. La dinámica de fluidos computacional (CFD, del inglés Computational Fluid Dynamics) es la técnica preferida cuando se requiere información espacialmente detallada. La misma se ha utilizado para simular la NV en diversas condiciones, incluyendo los flujos impulsados por el viento y/o la flotabilidad (Zhai, 2014). Sin embargo, en el contexto de la simulación del desempeño de edificios (BPS, del inglés Building Performance Simulation), donde se requiere una simulación anual de todo el edificio, las simulaciones CFD son inasequibles debido a sus costos computacionales.

Para predecir rápidamente los flujos de aire en todo un edificio, se han desarrollado varios modelos de flujo de aire de orden reducido. Zhai et al. (2015) realizaron una revisión exhaustiva de la literatura, concluyendo que los modelos analíticos sólo son aplicables a geometrías y fuerzas impulsoras específicas (es decir, una zona con una o varias aberturas), mientras que se requiere la solución numérica de un sistema de ecuaciones no lineales para escenarios más complejos (como flujos de aire multizona). Entre las opciones disponibles para flujos de aire multizona, Zhai et al. (2015) recomiendan el uso de los modelos de red de flujo de aire (AFN, del inglés AirFlow Network).

Una información crucial para los modelos AFN en BPS es la distribución de la presión inducida por el viento en las superficies del edificio, que generalmente se caracteriza por el coeficiente de presión del viento (C_p). Al estar directamente asociado con las tasas de cambio de aire, el C_p se convierte en un parámetro relevante en la simulación del consumo de energía, el confort térmico y la calidad del aire de los edificios.

El C_p , se define como la relación adimensional entre la diferencia de presiones estáticas (entre un punto de la fachada del edificio p y una presión de referencia en la corriente libre p_∞), y la presión dinámica del flujo de aire (viento) en la corriente libre (es decir, lejos de cualquier perturbación). Matemáticamente, el C_p se expresa como

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_H^2}$$

donde, ρ es la densidad del aire y U_H es la velocidad del viento en la corriente libre, que a menudo se toma a la altura media del techo H en el flujo no perturbado aguas arriba del edificio. La presión dinámica (y, por lo tanto, C_p) depende de varios parámetros como la geometría de la construcción, los detalles y la posición del entorno, el entorno urbano, y la dirección y velocidad del viento.

Estado del arte del problema

Actualmente, dada la complejidad de la variación espacial del C_p , los modelos de BPS y AFN lo incorporan de manera simplificada, generalmente a través del valor promedio de la superficie (\bar{C}_p) (Cóstola et al., 2009). Para determinar \bar{C}_p , la mayoría de los programas BPS-AFN utilizan fuentes de datos secundarias como bases de datos (Orme & Leksmono, 2002; ASHRAE, 2009) y modelos analíticos calibrados con mediciones experimentales (Swami & Chandra, 1988;

Grosso, 1992). En particular, el software de BPS EnergyPlus™ (Crawley et al., 2001) utiliza por defecto el modelo analítico propuesto por Swami & Chandra (1988).

El principal inconveniente de las fuentes de datos secundarias es su precisión y su aplicación limitada de forma exclusiva a edificios de planta rectangular, por lo que el alcance de diversas aplicaciones e investigaciones se restringe a este tipo de edificios. Recientemente, Bre et al. (2018) propusieron una metodología basada en redes neuronales artificiales para predecir datos de $\overline{C_p}$ para edificios de poca altura con diferentes tipos de techos (plano, dos y cuatro aguas), dichos modelos demostraron ser más precisos que los modelos analíticos populares. Sin embargo, su extensión a formas completamente arbitrarias tampoco es asequible.

Por lo tanto, hasta el momento, cuando el edificio tiene una topología arbitraria, se debe utilizar una fuente de datos primaria para obtener los valores de $\overline{C_p}$. Una primera opción es realizar una medición en el túnel de viento. Sin embargo, esta alternativa rara vez se emplea durante el diseño de un edificio específico debido a su alto costo y el know-how necesario. La segunda opción consiste en el uso del CFD, el cual ha sido reconocido como una herramienta confiable para el cálculo de los $\overline{C_p}$ s (Coóstola et al., 2009; Montazeri & Blocken, 2013; Ntinis et al., 2018). A pesar de ello, el uso correcto de CFD requiere usuarios de una experticia y práctica avanzada, como también acceso a recursos computacionales de altas prestaciones.

En este sentido, el presente trabajo propone una herramienta basada en la nube para predicción de los coeficientes de presión inducidos por el viento sobre edificios de formas totalmente arbitrarias. Para esto, se desarrolla una herramienta automática de CFD para predecir los $\overline{C_p}$ sobre las superficies de edificios (paredes, techos, ventanas, puertas, etc.), para, luego, utilizar estos datos en modelos de ventilación natural multizona. La herramienta toma como entrada la geometría del edificio y del entorno urbano, las cuales pueden suministrarse a través de un archivo de malla .STL o el archivo de definición de EnergyPlus (.IDF), y el conjunto de ángulos de incidencia del viento requeridos. Teniendo en cuenta esta información, se realiza un proceso de generación de la geometría y mallado automático, y se impone y simula una configuración de CFD previamente calibrada. Los resultados se procesan posteriormente y se devuelven al usuario los datos de $\overline{C_p}$ por ángulo del viento por superficie del edificio analizado. La salida puede ser un texto simple o el archivo .IDF actualizado listo para ejecutar la simulación de EnergyPlus.

Metodología

En esta sección se describe la metodología de trabajo de la plataforma propuesta y brevemente los detalles de sus principales herramientas. Finalmente, se proponen una serie de casos de estudio para la validación de su funcionamiento.

Esquema de trabajo

La Figura 1 muestra el esquema de trabajo de la herramienta propuesta. La misma consiste en una plataforma web que se encuentra actualmente en desarrollo, implementada con tecnologías web modernas (html5+css+js) utilizando estilos *responsive* (diseño adaptable a distintos dispositivos) para permitir un acceso cómodo, práctico, y multiplataforma desde cualquier tipo de dispositivo con conexión a internet. Esta modalidad de trabajo permite el acceso a tecnologías de simulación computacional a profesionales de áreas de construcción a través de una herramienta que minimiza la inversión inicial (es decir, el usuario no precisa comprar hardware ni software).

La modalidad de trabajo es la siguiente: un usuario registrado accede a la plataforma y proporciona los datos requeridos, a saber: la geometría del edificio, segregada en superficies distinguibles, y su entorno, si se requiere, (se admite formato .stl, .idf, .cityGML, entre otros), la selección de ángulos de incidencia del viento a simular, y envía una solicitud de trabajo. A partir de estas entradas, la suite de herramientas de cómputo en la nube procesa la geometría y genera un mallado del túnel de viento virtual de forma automática a partir de tamaños característicos detectados en la geometría. Empleando una configuración CFD optimizada en base a trabajos de investigación previos de los autores

(ver Sección Configuración CFD), se dispara una solicitud de trabajo en la cola de ejecución del servicio de cómputo en la nube. Una vez finalizada la simulación se post-procesan los resultados también de forma automática para obtener la matriz de $\overline{C_p}$ por superficie y por ángulo de incidencia, cargas extremas de viento y diversas capturas de los campos solución de cada escenario simulado. Por último, se envían por correo electrónico los resultados al usuario, incluyendo además de los anteriores, el archivo .idf modificado con los datos de coeficiente de presión computados, listo para su ejecución en EnergyPlus.

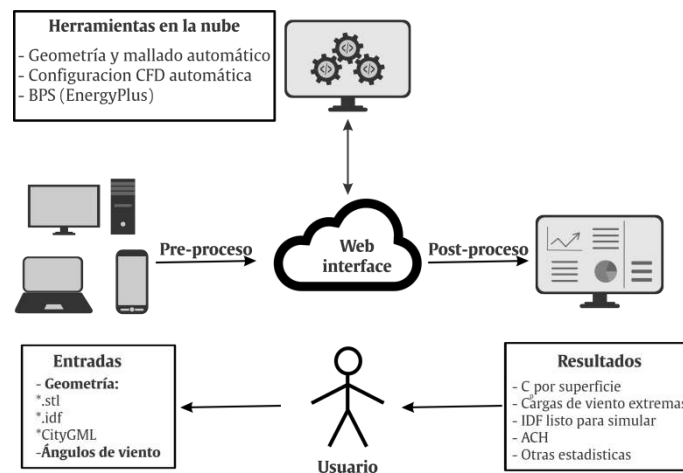


Figura 1. Diagrama del esquema de trabajo de la herramienta.

Simulaciones CFD

El flujo de capa límite atmosférica puede ser considerado como incompresible y homogéneo, esto es, densidad ρ y viscosidad ν constantes. Debido a la imposibilidad práctica de resolver una simulación numérica directa (DNS), se emplean modelos que disminuyan los requerimientos computacionales, siendo los enfoques de tipo RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) los más utilizados hoy en día para el modelado de la turbulencia y, por lo tanto, son también los elegidos para implementar en la plataforma propuesta en el presente trabajo. Cuando se utiliza un modelo RANS, la velocidad u_i y la presión p son descompuestas en su parte promediada en el tiempo y fluctuante, esto es $u = U + u'$ y $p = P + p'$. Esta descomposición es utilizada en las ecuaciones estándar de Navier-Stokes y luego de un promediado temporal, se arriba al sistema de ecuaciones RANS:

$$\nabla \cdot U = 0, (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \nabla U = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \Delta U - \nabla \cdot (\overline{u'u'}), (2)$$

donde las incógnitas son el campo de velocidad promedio U y el campo de presión promedio P . Un modelo de turbulencia RANS es entonces una estrategia de cierre para estimar el tensor de tensiones de Reynolds, esto es $(\overline{u'u'})$. La mayoría de estos enfoques (familia $k-\epsilon$, familia $k-\omega$, etc.) asumen que la parte fluctuante obedece a la hipótesis de Boussinesq, de tal manera que restringen el modelado a una única variable ν^t , llamada viscosidad de remolino.

Es bien conocido que los modelos estándares de turbulencia presentan limitaciones en la predicción del flujo alrededor de cuerpos romos. En este contexto, los autores han determinado en un trabajo previo (Gimenez et al., 2018) que los modelos de turbulencia Renormalization Group $k-\epsilon$ (RNG) y Spalart-Allmaras (SA) son los más precisos

para edificios bajos y aislados. Además, recientemente los autores (Gimenez & Bre, 2019) han recalibrado estos dos modelos mediante una optimización basada en simulaciones para mejorar la predicción de los $\overline{C_p}$ s en superficies de edificios bajos aislados. Estos nuevos modelos, llamados de ahora en adelante como RNG-opt y SA-opt, están disponibles para su uso en la plataforma además de sus correspondientes versiones originales RNG-std y SA-std.

Configuración CFD

Las ecuaciones RANS estacionarias, es decir, Ecuaciones (1) y (2) sin considerar el primer término en (2), son resueltas mediante el método de los volúmenes finitos utilizando un enfoque segregado, el cual acopla los campos de velocidad y presión mediante el algoritmo SIMPLE (Ferziger & Perić, 2002). Esta hipótesis de flujo estacionario supone que las variables del flujo promediadas no cambian en el tiempo, suposición que es ampliamente utilizada para la simulación de ABL (Gimenez et al., 2018). El túnel de viento virtual utilizado es a escala real, mientras que las dimensiones utilizadas cumplen los requisitos mínimos establecidos por la guía Europea de buenas prácticas COST Action 732 (ver Figura 2(a)). Para establecer correctamente las condiciones de contorno y utilizar una única malla, el límite externo del dominio es representado por un polígono regular de K lados, lo que permite seleccionar ángulos de ingreso de flujo cada $360^\circ/K$. Para la discretización del espacio se utilizan mallas hexa-dominantes con refinamiento volumétrico hacia el/los edificios cumpliendo con los tamaños establecidos en el documento guía.

El perfil de flujo turbulento impuesto a la entrada que sintetiza el comportamiento de una capa límite atmosférica (ABL, por sus siglas en inglés) es de tipo logarítmico (ver Figura 2(b)). El modelo utilizado provee perfiles de velocidad, de las variables turbulentas, y considera la rugosidad del suelo. La herramienta ofrece una configuración de este perfil de forma predefinida, pero es posible cambiar varios parámetros si así se lo requiere. Finalmente, sobre el suelo se imponen condiciones de borde compatibles para evitar el decaimiento del perfil de ingreso, mientras que sobre el edificio se considera no-deslizamiento para la velocidad y se utilizan funciones de pared híbridas (para bajos y altos Reynolds simultáneamente) para las variables turbulentas.

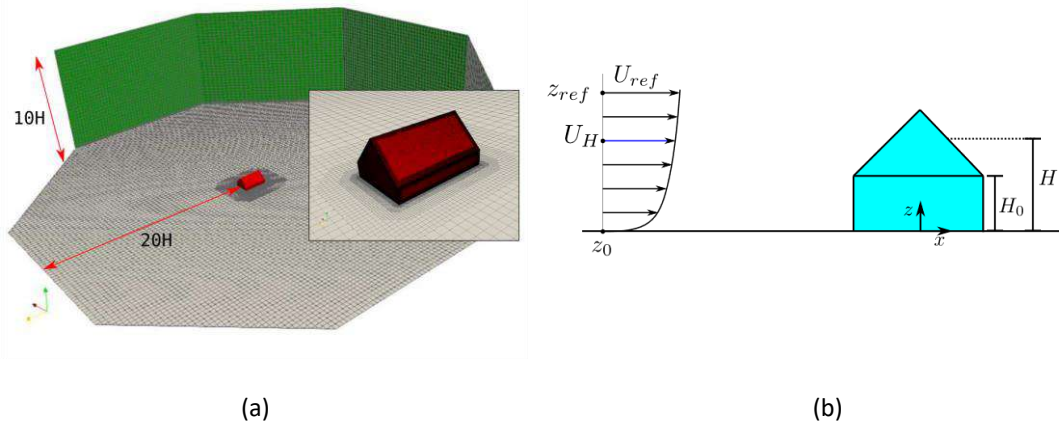


Figura 2. Referencias del túnel de viento virtual; (a) límites del dominio y grilla computacional sobre un edificio de ejemplo y el suelo con algunas distancias características; (b) perfil ABL con parámetros ajustables por el usuario.

El procedimiento de simulación es el siguiente: se inicializa cada simulación con condiciones de flujo libre en cualquier parte del dominio. Al comienzo se utilizan esquemas de primer orden para los términos advectivos junto a parámetros de relajación para garantizar la estabilidad en los instantes iniciales. Luego de 250 iteraciones se cambia a esquemas espaciales y temporales de segundo orden sin relajación. La simulación estacionaria continúa hasta que los residuos de

continuidad, de componentes de la velocidad y de las variables turbulentas hayan disminuido al menos cuatro órdenes de magnitud cada uno.

Cálculo de los \bar{C}_p s

Una vez obtenida la solución numérica del caso simulado, el \bar{C}_p para cada superficie i del edificio se obtiene computando

$$\bar{C}_p(i) = \frac{1}{A_i} \sum_{j=1}^{N_i} C_{p_j} A_j$$

donde C_{p_j} es el coeficiente de presión computado en la cara j -ésima, de área A_j , de la discretización por volúmenes finitos sobre la superficie i , siendo N_i el número de caras total, y $A_i = \sum_{j=1}^{N_i} A_j$. Notar que el concepto de superficie aquí utilizado es independiente de la utilización final en el edificio, esto es, la superficie puede definir una abertura (ventana, puerta), una pared ciega, o una composición de ambos. Finalmente es el usuario a través de su especificación de la geometría quien define el nivel de fraccionamiento de las regiones del edificio a analizar.

Casos de estudio

Con el objetivo de probar el funcionamiento de la herramienta, se proponen una serie de casos de estudio para edificios de baja altura con ambos entornos: edificios aislados y con condiciones circundantes. Además, para validar la precisión de la herramienta, sus resultados son comparados con valores experimentales obtenidos en mediciones de túnel de viento. En particular, se utilizan las realizadas por el Centro de Información de Ingeniería de Viento de la Universidad Politécnica de Tokio (TPU) y disponibles en la TPU Aerodynamic Database (TPU, 2019).

La base de datos aerodinámica TPU, tiene, entre otros, valores estadísticos de los coeficientes de presión del viento promediados en la superficie en los techos y las paredes de un conjunto de casos de prueba. Para edificios aislados tiene tres tipos de modelos: con techo plano, a dos y a cuatro aguas, varias relaciones de altura/ancho (H/B) y de profundidad/ancho (D/B), e inclinaciones para techos (β) (ver Figuras 3 (a)-(c)). Para edificios no aislados, además de las variantes anteriores se tienen variantes en el tipo de arreglo de los edificios (estructurada, escalonada o aleatoria), densidad de área de planta de los modelos (C_A), y se diferencia entre la relación altura/anchura (H/B) para el edificio objetivo y los edificios circundantes (H_{SURR}/B_{SURR}).

En este trabajo, para edificios aislados, se seleccionan los tres tipos de techo disponibles, considerando el ángulo del techo para $\beta=45^\circ$ para los techos a dos y a cuatro aguas. En cuanto a las relaciones de aspecto, se eligen las proporciones más extremas (difíciles de predecir debido a sus formas) de $D/B=3/2$ y $H/B=1/4$. Además, para cada tipo de techo, se seleccionan los ángulos de incidencia de viento $\theta=0$ a 180° cada 15° . Nótese que la base TPU tiene datos hasta 90° , los demás datos se pueden obtener por simetrías como se explica en Bre et al. (2018). Con el fin de probar todo el esquema de trabajo de la herramienta, para cada caso de estudio se genera un archivo IDF de EnergyPlus con las correspondientes geometrías como se ven en las Figuras 3(d)-(f).

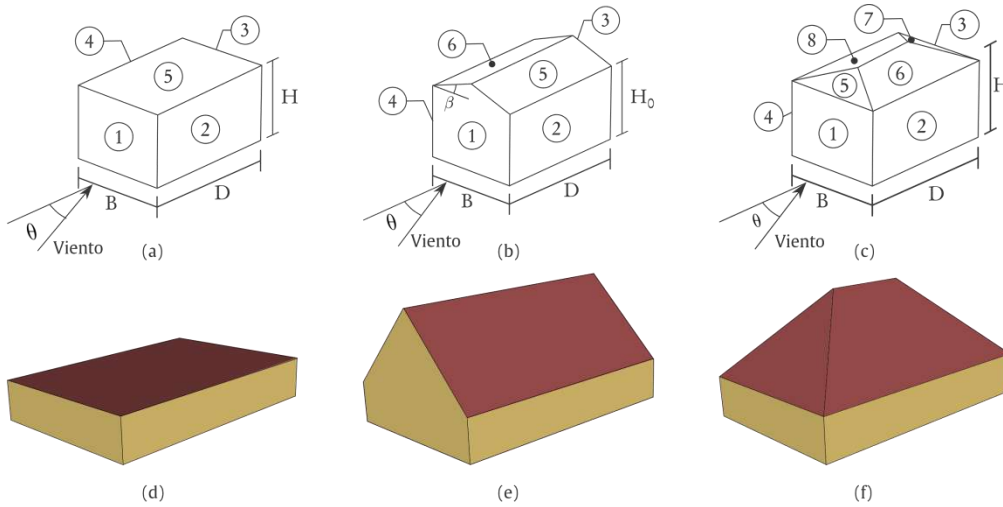


Figura 3. Referencias geométricas de los modelos de la base de datos TPU, (a) Techo Plano, (b) Techo a dos aguas, (c) Techo a cuatro aguas, donde B = ancho, D = profundidad, H = altura promedio del techo, θ = ángulo de incidencia del viento. (d)-(f) geometrías generadas en los archivos IDF para los casos de estudio adoptados ($D/B=3/2$, $H/B=1/4$ y $\beta=45^\circ$ en los casos (e) y (f)).

Para el caso de edificios no aislados se adopta un tipo de arreglo regular con una densidad de área de planta de los modelos $C_A=0.25$, y las relaciones de aspecto $D/B=3/2$, $H/B=3/4$, $H_{SURR}/B_{SURR}=3/4$, y ángulos de incidencia del viento $\theta = 0, 22.5, 45, 67.5$ y 90° , ver Figura 4.

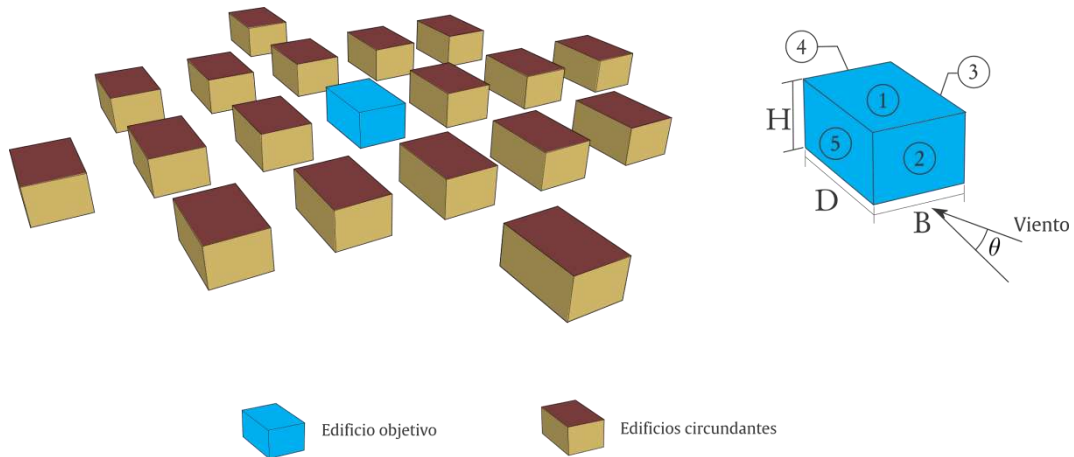


Figura 4. Referencias geométricas para el caso de estudio de edificio con condiciones circundantes de arreglo regular y $C_A=0.25$, $D/B=3/2$, $H/B=3/4$, $H_{SURR}/B_{SURR}=3/4$.

Resultados

Esta sección tiene como objetivo presentar y discutir los principales resultados obtenidos para los casos de estudio propuestos.

Edificios aislados

Como se mencionó anteriormente, para edificios aislados la herramienta cuenta con 4 modelos de turbulencia disponibles, SA-std, RNG-std, SA-opt y RNG-opt. La Figura 5(a) muestra un ejemplo de los resultados obtenidos para el caso de techo a cuatro aguas y un ángulo de incidencia del viento $\theta = 45^\circ$ con los modelos de turbulencia RNG-std y RNG-opt. Por otro lado, la Figura 5(b) muestra los mismos resultados para el caso del edificio con techo plano y $\theta = 0^\circ$ con los modelos de turbulencia SA-std y SA-opt. En ambos casos, la predicción de los $\overline{C_p}$ s con la versión estándar de los modelos de turbulencia son mejores sobre las superficies a barlovento (Surf-1 y Surf-2 en Fig. 5(a) y Surf-1 en Fig. 5(b)) que en aquellas a sotavento (Surf-3, Surf-4, Surf-7 y Surf-8 en Fig. 5(a) y Surf-3 en Fig. 5(b)). Dicho fenómeno es claramente mejorado por los modelos recalibrados (RNG-opt y SA-opt).

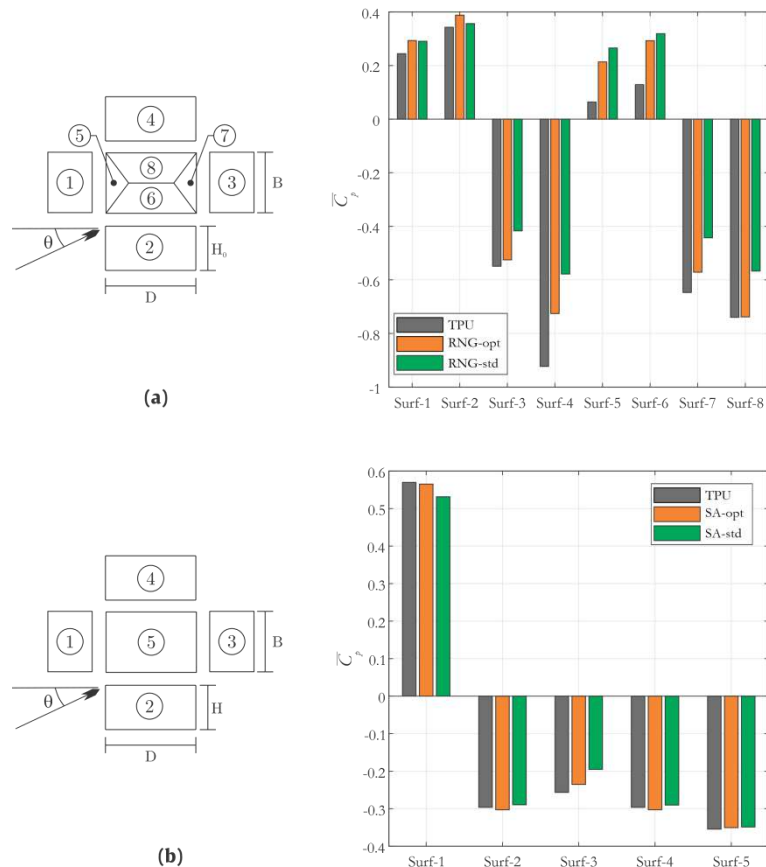


Figura 5. Resultados de los $\overline{C_p}$ s obtenidos mediante CFD: (a) edificio con techo a 4 aguas y un ángulo de incidencia del viento $\theta = 45^\circ$, (b) edificio con techo plano y un ángulo de incidencia del viento $\theta = 0^\circ$.

La Figura 6 muestra cuatro ejemplos sobre 2 de los casos de estudio (techo plano y a 2 aguas) en diferentes superficies con el objetivo analizar la precisión de la herramienta sobre las diferentes características de flujo.

La Figura 6(a) compara la predicción del \overline{C}_p en la Surf-1 del edificio de techo plano para cada ángulo de incidencia de viento simulado. De estos resultados, se observa un acuerdo satisfactorio, con una pequeña tendencia a la sobrepredicción en las simulaciones con el modelo RNG-opt cuando $\theta \leq 90^\circ$, es decir, cuando el viento impacta en la superficie. Sin embargo, el modelo RNG-std tiene una predicción más pobre del \overline{C}_p en los ángulos restantes, es decir, cuando la superficie está a sotavento del flujo, comportamiento que ya ha sido reportado en otros trabajos (Gimenez et al., 2018; Montazeri & Blocken, 2013). En estos ángulos es donde el modelo RNG-opt logra una gran mejora de la exactitud de la predicción. Se pueden observar resultados similares para el modelo SA si se analiza para la Surf-3 del edificio con techo a dos aguas (Figura 6(c)). Allí, el modelo SA-std tiende a subestimar la magnitud del \overline{C}_p cuando la superficie está a sotavento, y donde el modelo SA-opt mejora claramente estos resultados. Mientras que para los ángulos de impacto (\overline{C}_p positivos), ambos modelos tienen una ligera subpredicción de los valores.

Cuando se analiza la Surf-2 (Figura 6(b)), las predicciones de RNG tienen buena concordancia con los datos experimentales para casi todos los ángulos, excepto para los extremos ($\theta = 0^\circ$ y 180°). En concordancia con el análisis de superficies restantes, cuando la superficie es una fachada a barlovento ($0^\circ < \theta < 180^\circ$ para la Surf-2), la predicción de CFD para el \overline{C}_p es precisa incluso utilizando la versión estándar de los modelos de turbulencia. El caso opuesto es el de la Surf-4 (Figura 6(d)), donde la superficie es una fachada a sotavento para casi todos los ángulos de incidencia del viento. Aquí, la calidad de la predicción SA-std es pobre, pero esto es considerablemente mejorado por el modelo SA-opt.

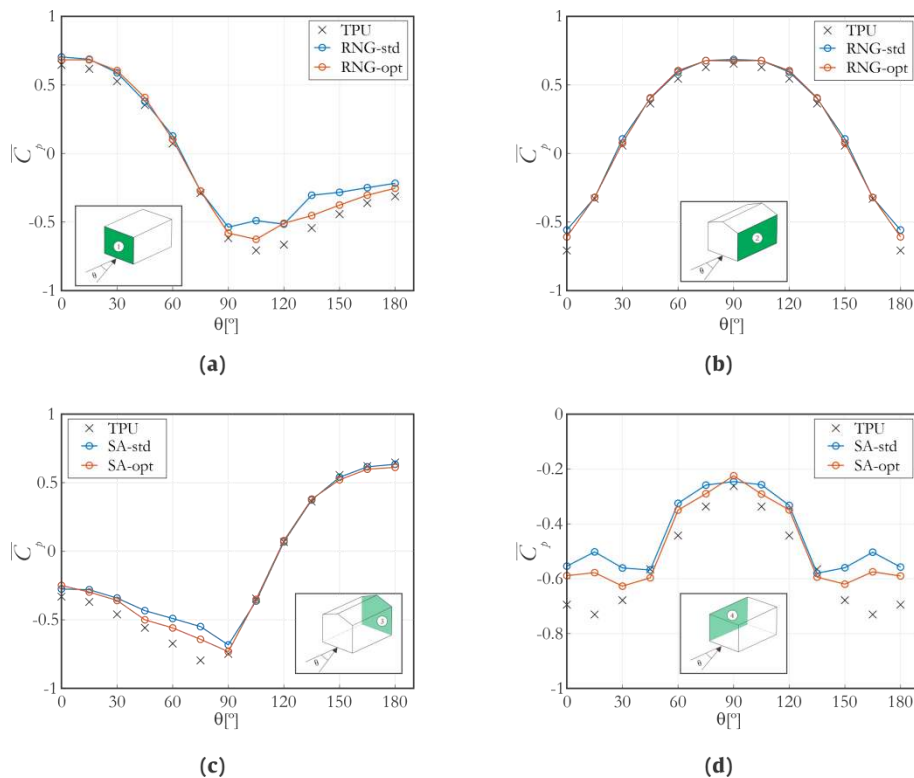


Figura 6. Comparación de la predicción del \overline{C}_p utilizando los distintos modelos de turbulencia (optimizados y estándar) con datos experimentales de TPU, incluyendo una descripción gráfica del tipo de techo y la superficie analizada.

Además de los valores procesados de los $\overline{C_p}$ s, la herramienta permite obtener diferentes resultados sobre los campos de presión y velocidad obtenidos alrededor del edificio. La Figura 7 muestra un ejemplo de la distribución de presión sobre las superficies y el campo de velocidades sobre un plano horizontal ($Z=0.2$ m) para el caso de techo a 2 aguas y un ángulo de incidencia del viento $\theta = 45^\circ$.

Nótese, que en el ensayo de túnel de viento “virtual” que ofrece la herramienta, gracias al enfoque CFD utilizado, el usuario puede realizar una medición por cada celda del dominio discretizado y en un lugar tan pequeño como el tamaño del elemento en cuestión. Esta ventaja permite integrar valores con mayor precisión sobre aberturas como ventanas y puertas, dicha funcionalidad está siendo actualmente implementada sobre la herramienta de forma de detectar automáticamente aquellas aberturas que estén definidas en el archivo de definición de EnergyPlus (.IDF). Con la incorporación de esta funcionalidad, el usuario podrá seleccionar aquellas aberturas sobre la cuales quiere procesar los valores del $\overline{C_p}$.

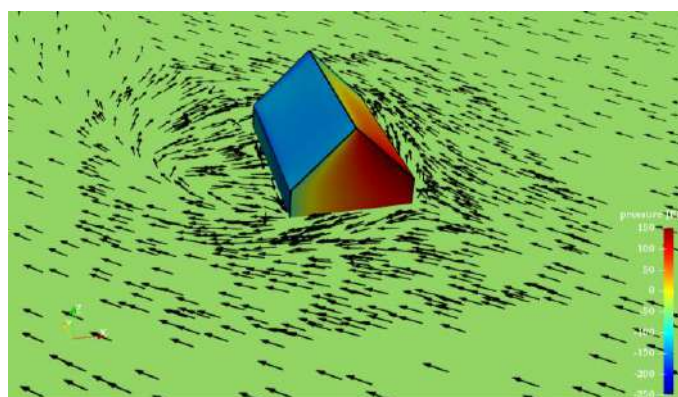


Figura 7. Distribución de presión sobre las superficies y campos de velocidades sobre un plano horizontal ($z=0.2$ m) para el caso de techo a 2 aguas y un ángulo de incidencia del viento $\theta = 45^\circ$.

Edificios con condiciones circundantes

Uno de los desafíos principales es lograr una robustez general de la herramienta sobre diferentes casos de aplicación. En este sentido, la herramienta está preparada para resolver tanto casos de edificios aislados, como de edificios con condiciones circundantes siempre y cuando la geometría del edificio objetivo y su entorno sea suministrada correctamente. La Figura 8 muestra los resultados obtenidos mediante la herramienta para el caso de estudio propuesto utilizando los 2 modelos de turbulencia, y para los ángulos de incidencia del viento de $\theta = 0^\circ$ y $\theta = 45^\circ$, Figuras 8(a) y 8(b) respectivamente. En general se puede observar que la predicción del modelo SA-std es buena para aquellas superficies con un valor negativo de presión, es decir, Surf-1, Surf-3, Surf-4 y Surf-5 en ambos casos. Sin embargo, en aquellas superficies donde la presión tiene un valor positivo (Surf-2 para ambos casos) la predicción del modelo SA-std tiene grandes diferencias con los valores experimentales. En contraposición, el modelo RNG-std mejora la predicción en aquellas superficies con presión positiva, pero empeora en la aquellas de valores negativos. Estas diferencias entre los resultados experimentales y los simulados se deben a las limitaciones de las versiones estándar de los modelos RANS para predecir los complejos patrones de flujo que se generan en entornos urbanos (ver Figura 9). Limitaciones que ya han sido reportadas por Shirzadi et al. (2018).

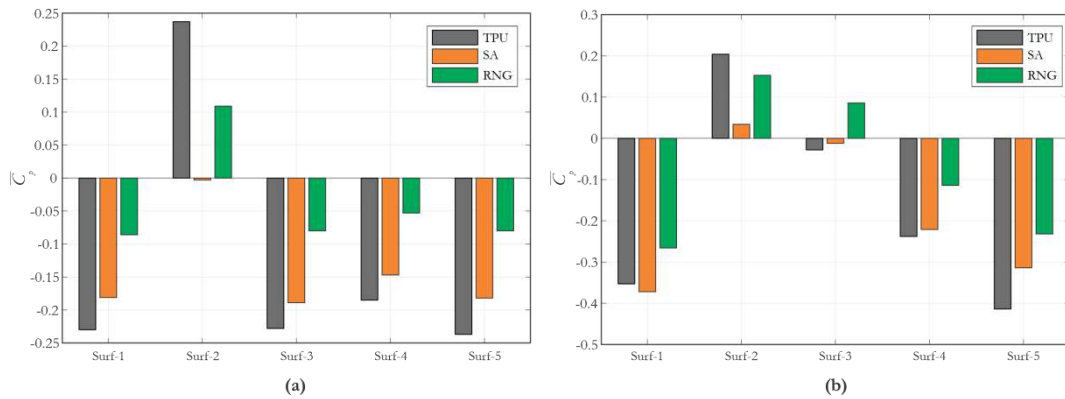
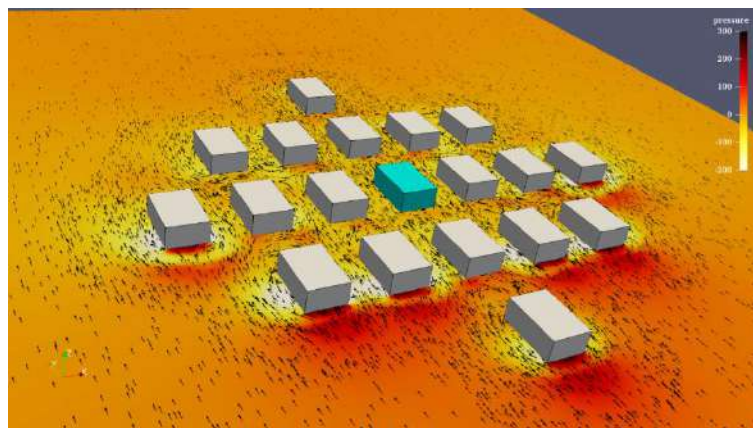
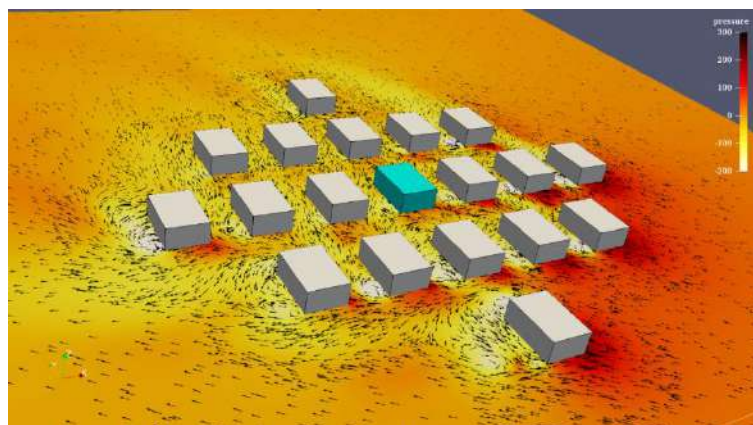


Figura 8. $\overline{C_p}$ sobre las superficies de un edificio con edificios circundantes en un arreglo regular, con una densidad de área de planta de los modelos $C_A=0.25$, y las relaciones de aspecto $D/B=3/2$, $H/B=3/4$, $H_{SURR}/B_{SURR}=3/4$. (a) ángulo de incidencia del viento $\theta = 0^\circ$, (b) ángulo de incidencia del viento $\theta = 45^\circ$.



(a)



(b)

Figura 9. Patrones de flujo obtenidos mediante CFD usando el modelo SA para el entorno urbano analizado. (a) ángulo de incidencia del viento $\theta = 0^\circ$, (b) ángulo de incidencia del viento $\theta = 45^\circ$.

Discusión y Conclusiones

Este trabajo presentó una nueva herramienta basada en la nube para simular la ventilación natural en edificios. En esta primera etapa, el trabajo se focalizó en el desarrollo de una herramienta automática de simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD) para predecir los coeficientes de presión promedio en las superficies ($\overline{C_p}$) para, luego, utilizar estos datos en modelos de ventilación natural.

En la herramienta propuesta, el usuario puede solicitar un ensayo en un túnel de viento virtual ingresando solamente como datos de entrada la geometría del edificio y el conjunto de ángulos de incidencia del viento deseados. La geometría puede ser suministrada a través de un archivo de malla (.STL) o el propio archivo de definición del programa EnergyPlus (.IDF). Una vez ingresado los datos de entrada, la herramienta se vale de diferentes módulos automáticos para la generación de la geometría (caso IDF como entrada), mallado, simulación CFD y post-procesado.

Los resultados de la aplicación de la herramienta para los casos propuestos de edificios bajos y aislados mostraron una muy buena precisión al compararlos con resultados experimentales. Además, se observó que la predicción de los aspectos más complejos del flujo se mejora considerablemente al utilizar los modelos de turbulencia recalibrados (SA-opt y RNG-opt) para esta aplicación particular. En el caso de edificios no aislados (entornos urbanos), se observó que, de los modelos de turbulencia implementados en la herramienta, SA-std y RNG-std, el primero tiene una buena predicción sobre aquellas superficies con un valor negativo de presión (a sotavento), pero no para aquellas con un valor positivo de la misma (a barlovento). Utilizando el segundo modelo la conclusión sobre los resultados es exactamente la opuesta. Estos últimos resultados indican la necesidad de recalibrar modelos de turbulencia para flujos en entornos urbanos, o proponer un nuevo enfoque que subsane el problema en cuestión.

En la actualidad, los esfuerzos están principalmente focalizados en el desarrollo de la interfaz de la herramienta y de diferentes funcionalidades que aumenten su generalidad. En trabajos futuros se incorporarán los módulos de simulación y postproceso necesarios para la evaluación de la ventilación natural dentro de la propia plataforma.

Agradecimientos

Queremos agradecer por financiar este trabajo: a la Universidad Nacional del Litoral a través del proyecto CAI+D 2016 PJ 50020150100018LI y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica a través del proyecto PICT-2016-2673.

Referencias

- ASHRAE (2009). ASHRAE Handbook—Fundamentals. Atlanta, GA, USA: American Society of Heating, Refrigerating and AirConditioning Engineers.
- Bre F., Gimenez J. M., & Fachinotti V. D. (2018). Prediction of wind pressure coefficients on building surfaces using artificial neural networks. *Energy and Buildings*, 158: 1429–1441.
- Chen Y., Tong Z., & Malkawi A. (2017). Investigating natural ventilation potentials across the globe: Regional and climatic variations. *Building and Environment*, 122: 386–396.
- Cóstola D., Blocken B., & Hensen J. L. M. (2009). Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs. *Building and Environment*, 44: 2027–2036.
- Crawley D. B., Lawrie L. K., Winkelmann F. C., Buhl W. F., Huang Y. J., Pedersen C.O., Strand R.K., Liesen R.J., Fisher D.E., Witte M.J., & et al. (2001). EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and buildings*, 33: 319–331.
- de Dear R. J. & Brager G. S. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, 34: 549–561.
- Ferziger J. H. & Perić M. (2002). Computational Methods for Fluid Dynamics, 3rd edn. New York: Springer.

- Franke J., Hellsten A., Schlünzen H., & Carissimo B. (2007). Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. *COST action*, 732:51.
- Gimenez J. M., Bre F., Nigro N. M., & Fachinotti V. (2018). Computational modeling of natural ventilation in low-rise non-rectangular floor-plan buildings. *Building Simulation*, 11(6): 1255-1271.
- Gimenez J. M. & Bre F. (2019). Optimization of RANS turbulence models using genetic algorithms to improve the prediction of wind pressure coefficients on low-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 193:
- Grosso M. (1992). Wind pressure distribution around buildings: A parametrical model. *Energy and Buildings*, 18: 101–131.
- Montazeri H. & Blocken B. (2013). CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: Validation and sensitivity analysis. *Building and Environment*, 60: 137–149.
- Ntinas G. K., Shen X., Wang Y., Zhang G. (2018). Evaluation of CFD turbulence models for simulating external airflow around varied building roof with wind tunnel experiment. *Building Simulation*, 11: 115–123.
- Orme M. & Leksmono N. (2002). AIVC Guide 5: Ventilation modelling data guide. International Energy Agency, Air Infiltration Ventilation Center. AIC-GUI, 5.
- Oropeza-Perez I. & Østergaard P. A. (2014). The influence of an estimated energy saving due to natural ventilation on the Mexican energy system. *Energy*, 64: 1080–1091.
- Seppänen O. & Fisk W. J. (2002). Association of ventilation system type with SBS symptoms in office workers. *Indoor Air*, 12: 98–112.
- Shirzadi M., Naghashzadegan M., & Mirzaei P. A. (2018). Improving the CFD modelling of cross-ventilation in highly-packed urban areas. *Sustainable cities and society*, 37: 451-465.
- Sorgato M. J., Melo A.P., & Lamberts R. (2016). The effect of window opening ventilation control on residential building energy consumption. *Energy and Buildings*, 133: 1–13.
- Swami M. V. & Chandra S. (1988). Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow. *ASHRAE Transactions*, 94(1): 243–266.
- TPU, 2019, *TPU Aerodynamic Database*, Global Center of Excellence Program, Tokyo Polytechnic University, Tokyo, Japan. (<http://wind.arch.t.kougei.ac.jp/system/eng/contents/code/tpu>)
- Zhai Z. (2014). Computational fluid dynamics applications in green building design. In: Al-Baghdadi MARA (Ed), Computational Fluid Dynamics Applications in Green Design. *International Energy and Environment Foundation (IEEF)*, pp. 1–22.
- Zhai Z., Mankibi M. E., Zoubir A. (2015). Review of natural ventilation models. *Energy Procedia*, 78: 2700–2705.