

EVALUACIÓN MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE VENTILACIÓN DE COCINAS RESIDENCIALES EN CLIMA CÁLIDO-HÚMEDO POR MEDIO DE CHIMENEAS SOLARES

Alejandro Naranjo Gaviria^{a,b,c}, Roberto Lamberts^a

^a*LABEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, roberto.lamberts@ufsc.br, <http://www.labeee.ufsc.br/>*

^b*Pós-arq - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil. posarq@arq.ufsc.br, <http://posarq.ufsc.br/>*

^c*Grupo EMAT - Energia, Arquitectura, Medio Ambiente y Tecnología, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, aanaranj@unal.edu.co, <http://www.unalmed.edu.co/~emat/>*

Palabras Clave: Arquitectura, Desempeño térmico, Ventilación, Efecto Chimenea, Chimenea Solar.

Resumen. El aumento considerable de las cargas de enfriamiento debido a las fuentes internas y externas y la acumulación de aire contaminado debido a los procesos de cocción, hacen que la mejora del comportamiento térmico y de la ventilación de una cocina residencial ubicada en un clima cálido-húmedo sea prioritario. La ventilación puede ser una estrategia eficiente para resolver esos problemas. Sin embargo, algunos lugares que tienen momentos considerables sin viento, como por ejemplo la ciudad de Quibdó en Colombia, requieren del uso de otras estrategias de acondicionamiento. Investigaciones anteriores demostraron la posibilidad de utilizar chimeneas solares para mejorar el desempeño ambiental de un espacio ubicado en esas condiciones climáticas. A fin de evaluar el potencial de las chimeneas solares sobre una cocina residencial, se utilizó un método de simulación computacional a través del programa Energyplus. En el modelado de las aberturas de la chimenea, se encontró que el objeto “Horizontal Opening” incluido en la versión 7.0 de este programa, no representa adecuadamente la ventilación generada por la diferencia de temperatura. Entre los resultados, se verificó (1) que la presencia del viento potenciaba el “efecto chimenea” sin importar la dirección que tuviese la corriente, (2) la inclinación de 50° en la chimenea es el valor que permite obtener el mejor comportamiento de la cocina para la latitud de Quibdó, (3) la localización de la cocina en la planta arquitectónica que permitió obtener el máximo desempeño debido al uso de la chimenea es aquella en la cual se tiene la mayor separación en el plano vertical entre las aberturas de entrada y salida de la chimenea y (4) se encontró que la mejoría obtenida a través del aumento del área de absorción en la chimenea tiene un límite cuando se considera el día entero. A partir de las simulaciones realizadas para el día entero se concluye que el uso de chimeneas solares no produjo mejorías significativas en la temperatura y la ventilación de cocinas residenciales localizadas en el clima cálido-húmedo de Quibdó. El mejor comportamiento obtenido con el uso de chimeneas solares, fue de tan solo 3,6 “Renovaciones de aire por hora – ACH” sobre un espacio de 14,9m³, pese a utilizar una gran área de absorción en la chimenea equivalente a 5,8m².

1 INTRODUCCIÓN

El presente artículo evalúa el comportamiento térmico y de ventilación de cocinas residenciales localizadas en el clima cálido-húmedo de una ciudad de Colombia, con la utilización de chimeneas solares.

Las altas cargas de enfriamiento de una cocina residencial dificultan la obtención de niveles aceptables de confort térmico para las personas que las habitan, alterando su estado de ánimo y disminuyendo su disposición para realizar actividades. Dificultades adicionales surgen cuando la cocina se encuentra localizada en un ambiente de clima cálido-húmedo, en donde existe una gran dificultad para perder calor debido al pequeño diferencial térmico entre el interior y exterior de los espacios. Adicionalmente, las altas concentraciones de humedad disminuyen la capacidad del cuerpo humano para liberar calor a través del sudor.

De otra parte, es común que las cocinas presenten problemas de higiene debido a la acumulación de vapores, gases y grasas derivados de los procesos de cocción. Cuando esta situación no es solucionada, pueden surgir problemas para otros ambientes de la residencia debido a la propagación de esta contaminación.

Amparados en el uso de aparatos mecánicos de acondicionamiento y el suministro de energía, los proyectistas acaban ignorando su responsabilidad ante estas cuestiones. Sin embargo esta actitud trae consigo grandes problemas para el planeta. Además, cuando se consideran poblaciones de bajos ingresos, la baja capacidad adquisitiva y la ausencia de servicios públicos, imposibilitan el uso de la energía con la cual sería posible accionar estos sistemas.

El diseño bioclimático establece que la ventilación es una estrategia eficaz para atender las necesidades de confort en climas cálido-húmedos. Cuando el aire exterior tiene una temperatura más baja que la del interior, es posible perder parte del calor almacenado en las superficies del espacio a través de la convección. Adicionalmente, es posible compensar el efecto generado por la alta humedad, cuando el cuerpo humano es expuesto al aire en movimiento. Con la ventilación además, es posible atender las necesidades higiénicas, al renovar el aire contaminado.

No obstante, existen regiones tales como Quibdó en Colombia, donde el viento es escaso. Surge entonces la necesidad de encontrar otras estrategias que solucionen el confort y la higiene de cocinas residenciales, aun sin tener viento y evitando el uso de aparatos mecánicos. Debido a esto, el presente trabajo evalúa qué tan efectiva puede ser una estrategia pasiva de acondicionamiento, conocida como chimenea solar.

1.1 Chimenea solar

Mediante esta estrategia, es posible potencializar la ventilación generada por la diferencia de temperaturas. Al maximizar la ganancia de irradiación solar, se aumenta la diferencia de temperatura del aire de la chimenea con relación al exterior, permitiendo que el aire salga de la chimenea. Esta estrategia se compone de una superficie absorbente con alta absorción debidamente aislada del espacio ocupado por las personas, una cámara de aire y una cubierta de vidrio.

[Mathur et al. \(2006\)](#) y [Neves y Roriz \(2011\)](#) mejoraron la ventilación de un espacio a través de chimeneas, obteniendo hasta 5,6 “renovaciones de aire por hora” sobre un espacio de 27m³ en el primero y de 11,3 renovaciones sobre un espacio de 32,4m³ en el segundo.

Gran parte de los estudios sobre chimeneas solares están enfocados en estudiar las relaciones entre las dimensiones de sus componentes (longitud, ancho, inclinación, profundidad de la cámara de aire, localización y tamaño de aberturas de entrada y salida), y

las propiedades térmicas de los materiales con se construyen (absortancia de la superficie absorbente, transmitancia del vidrio, etc). Sin embargo, como lo señalan [Khanal y Lei \(2011\)](#), pese a la cantidad de investigaciones hechas sobre el tema, existen afirmaciones contradictorias que indican que esta estrategia no ha sido entendida completamente.

Si bien al aumentar la ganancia de irradiación se puede mejorar el comportamiento de una chimenea solar, es necesario tener precaución en la manera como se capta más irradiación. Aunque recostar la chimenea permite absorber mayor irradiación en el trópico, de esta manera se acorta la separación entre la abertura de entrada y salida disminuyendo el caudal. Por el contrario, una chimenea vertical ofrece mayor separación entre las aberturas de la chimenea, sin embargo así se disminuye la ganancia de irradiación ([Sakonidou et al. 2008](#)). Debido a esto [Mathur, Mathur y Anupma \(2006\)](#), concluyen que la inclinación ideal varía entre 40° y 60° dependiendo de la latitud del lugar. [Neves y Roriz \(2011\)](#) utilizan un extensor para capturar mayor irradiación sin perder altura entre las aberturas de entrada y salida de la chimenea, demostrando que es posible trabajar con una inclinación ideal sin perder separación entre las aberturas.

Considerando que en un clima cálido-húmedo es común tener condiciones de cielo nublado, [Yussof et al \(2010\)](#) evaluaron el desempeño de chimeneas solares durante los meses de menor cantidad de irradiación. Los resultados demuestran que aun bajo estas condiciones, los dispositivos permiten inducir la ventilación por el efecto chimenea.

Trabajos como el de [Khedari, Boonsri y Hirunlabh \(2000\)](#) concluyen que las chimeneas no son suficientes para ofrecer confort térmico pese a sus posibilidades. Debido a esto [Chungloo y Limmeechokchai \(2007\)](#), estudiaron la posibilidad de usar chimeneas solares en conjunto con otras estrategias.

El gran protagonismo que tienen las chimeneas solares en la apariencia de un edificio, exigen que estas sean consideradas desde las fases iniciales del proyecto para evitar alteraciones significativas en la configuración espacial. Con el fin de facilitar la integración de chimeneas solares en residencias, [Mathur et al \(2006\)](#) restringieron la longitud de las chimeneas usadas en sus experimentos a un valor máximo de 1m.

Si bien es posible aumentar la sensación de enfriamiento con velocidades de aire mayores, los valores alcanzados a través de chimeneas solares son muy bajos: Entre 0,02–0,09m/s ([Khedari; Boonsri; Hirunlabh, 2000](#)); 0,39m/s ([Ong; Chow, 2003](#)); 0,24m/s ([Bansal et al., 2005](#)); 0,58m/s ([Nugroho; Hamdan, 2006](#)); menos de 1m/s para alturas inferiores a 8m y hasta 1,4m/s para chimeneas de 12m ([Sakonidou et al., 2008](#)).

Dentro de los trabajos consultados, fueron pocos los que consideraron la influencia que podía tener el espacio arquitectónico sobre el desempeño de una chimenea. No fue encontrada ninguna referencia que evaluara el efecto de las cargas internas de una cocina residencial. Los estudios previos están enfocados en los momentos en que se tiene irradiación solar, ignorando el comportamiento de esta estrategia para el resto de horas del día.

El presente artículo resume la tesis de maestría desarrollada por [Gaviria \(2012\)](#), dentro del programa de posgrado en “Arquitectura e Urbanismo” de la “Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC”.

2 MÉTODO

Para evaluar el comportamiento térmico y de ventilación de una cocina residencial localizada en clima cálido-húmedo con la utilización de chimeneas solares, se configuró un modelo de simulación en [Energyplus \(2011\)](#) y se ejecutaron las simulaciones en 4 fases.

2.1 Modelo de simulación

El modelo de simulación se componía de: información climática, cargas de enfriamiento, patrón de uso de los ocupantes y modelación de chimeneas, casas y red de ventilación natural.

La información climática de la ciudad de Quibdó cuya latitud es $5,72^\circ$ Norte, se obtuvo del atlas climatológico de Colombia (Ideam, 2005) y del portal de internet [Tiempo.com \(2012\)](#). A partir de las normales climatológicas presentes en el atlas, se identificó el comportamiento general del clima en Quibdó en cada mes del año. Los datos del portal de internet, permitieron conocer el comportamiento de la temperatura y humedad de tres días de proyecto específicos según la hora del día. La información del portal de internet se encontró en concordancia con las tendencias identificadas en el atlas: Temp. $\frac{1}{2}$ = $26,5^\circ\text{C}$, temp. $\frac{1}{2}$ máx= $30,6^\circ\text{C}$, temp. $\frac{1}{2}$ mín= 23°C , humedad relativa $\frac{1}{2}$ = 86% . Las corrientes de viento predominantes vienen del norte y del sur con una velocidad $\frac{1}{2}$ = $1,5\text{m/s}$. Es importante anotar que en Quibdó no se cuenta con viento en más de la mitad del año. Utilizando el programa [Analysis Bio 2.2 \(Labeee, 2011\)](#), se construyó una carta bioclimática para Quibdó, con el fin de conocer los efectos de estas condiciones climáticas sobre el confort humano. Según el resultado obtenido en este programa es imposible estar en condiciones de confort en esta ciudad. Adicionalmente, se indica que a través de la ventilación, es posible obtener confort en $93,1\%$ del año y para el $6,9\%$ restante es necesario utilizar aire acondicionado. Los tres días de proyecto escogidos fueron: Solsticio verano-junio 21, equinoccio otoño-septiembre 21 y solsticio invierno-diciembre 21 (de acuerdo a la lógica del hemisferio norte). En cada día de proyecto se evaluaron las 3 condiciones de viento predominantes en Quibdó: Viento norte, sur y “sin viento”. Esta información se insertó en el Energyplus a través del objeto “Design Day”. Se asumieron condiciones de cielo nublado (Sky Clearness = 0,5) y superficies de la casa mojadas (Rain Indicator = 0,95), debido a la alta pluviosidad de esta ciudad.

Las cargas de enfriamiento de la cocina eran: 1 nevera (70W [Eletrobras, 2012](#)), 1 fogón (1930W), 1 horno (1670W), 1 lámpara fluorescente (15W) y 2 personas (171W/persona). Las personas entraban en diferentes momentos del día: 7–8am=2 personas, 8–9am=1 persona, 11–13pm=1 persona, 18–20pm=1 persona. El calor producido por las personas, se calculó con base en la tasa metabólica de 95W/m^2 o $1,6\text{MET}$ y considerando un área promedio de piel de $1,8\text{m}^2$. A excepción de la nevera, el resto de cálculos se hicieron con base en [Ashrae \(2001\)](#). Los electrodomésticos tenían el siguiente patrón de uso: Nevera=24h; Fogón=Entre 7-7:15 era accionado en un 50% , entre 11:15-11:30 funcionaba al 100% y entre 18-18:15 funcionaba al 50% ; Horno=11-11:15.

Las chimeneas se modelaron a través del grupo de objetos “Air Flow Network”, considerando una abertura a través de la cual se conectaba la chimenea con la cocina y otra por la cual la chimenea se comunicaba con el exterior. En su mayoría, las chimeneas utilizadas eran inclinadas y estaban localizadas en el techo. Estaban orientadas hacia el sur para aumentar la cantidad de irradiación incidente en ella, debido a que Quibdó se ubica al norte de la línea del ecuador. A excepción de la última fase, se trabajó con una chimenea con área de absorción= 1m^2 , para minimizar costos y viabilizar su uso por parte de personas con bajos ingresos. Las superficies opacas y vidriadas de la chimenea se modelaron conforme la [Figura 1](#). Para el piso de la chimenea ubicado al frente de la ventana de extracción de la cocina, fue necesario utilizar un material con mayor inercia térmica para que la simulación no presentara errores por las altas temperaturas presentadas en este elemento. Las aberturas de la chimenea estaban localizadas en el plano vertical. Se detectó que al utilizarse aberturas horizontales, la simulación no presentaba un comportamiento lógico: Cuando las temperaturas de la cocina y la chimenea eran mayores que el exterior, se tenían flujos reversos. Es decir, el aire en vez de salir para el exterior, regresaba para la cocina ([Figura 1](#)).

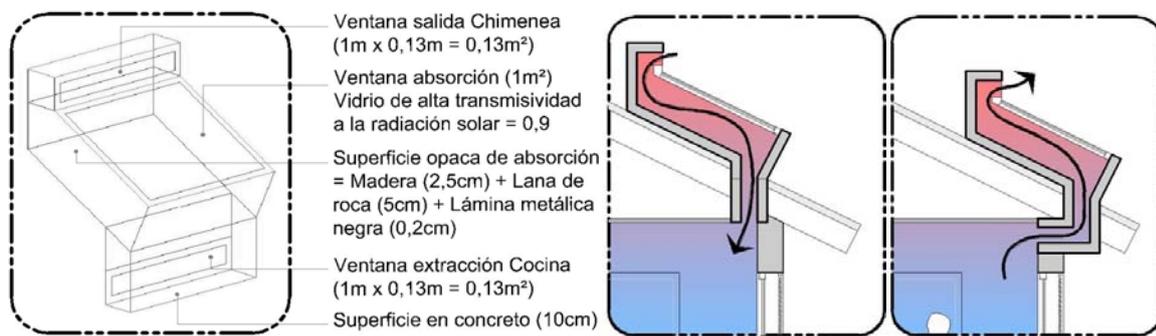


Figura 1: Izquierda: Detalle chimenea utilizada. Derecha: Dirección del flujo dependiendo de la orientación de las aberturas en Energyplus

Las 4 casas utilizadas en las simulaciones se diferenciaban por la cantidad de fachadas que tenía la cocina para comunicarse con el exterior. Los criterios para su diseño eran: (1) Mismo programa arquitectónico: Núcleo cocina + baño, núcleo sala de estar, y núcleo cuarto; (2) todos los núcleos debían tener contacto con el exterior aun cuando estuvieran en medio de otros núcleos; (3) área construida=66,56m². Los 3 núcleos básicos se modelaron en Energyplus a través de 4 zonas térmicas: Cocina (6,2m²), baño (4,7m²), sala de estar (22,4m²) y cuarto (33,3m²). Para disminuir las ganancias de calor, las fachadas estaban protegidas con aleros localizados en el perímetro del techo y se creó una quinta zona para el ático (Figura 2). Los materiales de las fachadas eran “leves” para facilitar las pérdidas de calor en la noche (momento en el que se tiene la mayor ocupación de la casa), y “reflectores” para disminuir ganancias de calor por irradiación. Las paredes estaban construidas en ladrillos de 14x29,5x19cm, con juntas entre estos de 1 cm y revocados por las dos caras con mortero de 2,5cm (espesor total de pared=19cm). La transmitancia térmica de las paredes era de 2,45 [W/m²K], la capacidad térmica de 203 [kJ/m²K] y el atraso térmico de 4 horas. En el techo se utilizó una teja de fibrocemento (0,7cm) con lámina de aluminio pulido en la cara interior y cielo falso de madera (1cm). La transmitancia térmica del techo era de 1,16 [W/m²K], la capacidad térmica de 25 [kJ/m²K] y el atraso térmico de 2 horas.

Se consideró que las ventanas de la cocina estaban compuestas por cuerpos de vidrio y persiana, dispuestos de tal manera que se tuviera el 50% de área del vano para ventilar. Los coeficientes de presión se obtuvieron a través del programa [TNO Cp Generator \(2012\)](#), localizando las coordenadas de los mismos en el centro de las ventanas y la salida de la chimenea. Para los coeficientes de descarga se adoptó un valor 0,6 de acuerdo a los sugerido por [Anderson \(apud Mathur, 2006\)](#).

2.2 Fases de las simulaciones

En cada una de las 4 fases de simulación se analizaron parámetros diferentes. Conforme avanzaban las fases, se adoptaban las mejores configuraciones encontradas en la fase anterior sobre las condiciones más exigentes para alcanzar confort térmico, con el fin de obtener el mejor comportamiento en la cocina y evitar el procesamiento excesivo de datos.

En la fase 1 se analizaron los efectos producidos por las temperaturas de los 3 días de proyecto y las 3 condiciones de viento definidas previamente. Para esta fase se utilizó la casa 1 (Figura 2) con una chimenea cuya inclinación era igual a la pendiente del techo=26,7°. Para tener una referencia del efecto de la chimenea, se simuló un caso sin esta estrategia.

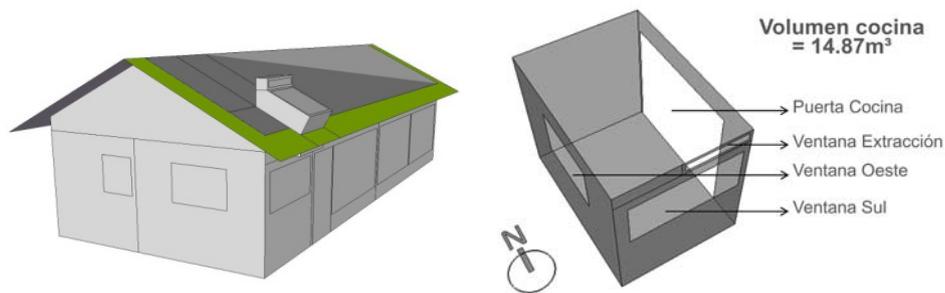


Figura 2: Izquierda: Geometría de la Casa fase 1, Derecha: Aberturas de la cocina

En la fase 2, se analizó la influencia que tenía la inclinación de la chimenea sobre la cocina. En primer lugar se evaluó cómo aumentaba la ganancia de irradiación en función de la inclinación de la chimenea. Seguidamente, se evaluó el efecto de 3 inclinaciones de chimenea sobre el comportamiento de la cocina utilizada en la fase 1. A partir de la fase 2 solo se consideraron las condiciones más exigentes para el confort: solsticio verano + sin viento.

En la fase 3 se verificó cuál cocina se comportaba mejor debido al uso de la chimenea solar, considerando variaciones en la localización de este ambiente en la casa (Figura 3). En esta fase se adoptó la mejor inclinación de la chimenea encontrada en la fase 2. Según la localización de la cocina, las orientaciones y la cantidad de área de fachadas en contacto con el exterior cambiaban: Cocina de la casa 3 tenía mayor contacto con el exterior, sus fachadas tenían 74,7% más que la cocina 2 y 37,4% más de área que las cocinas 1 y 4; todas las cocinas tenían fachada al sur; todas las cocinas, excepto la 2, tenían fachada sobre el oeste; la cocina 3 era la única que tenía fachada sobre el este; a excepción de la cocina 4, el restante de las cocinas tenía contacto directo con el ático. Debido a esto, los intercambios por radiación y convección se modificaban.

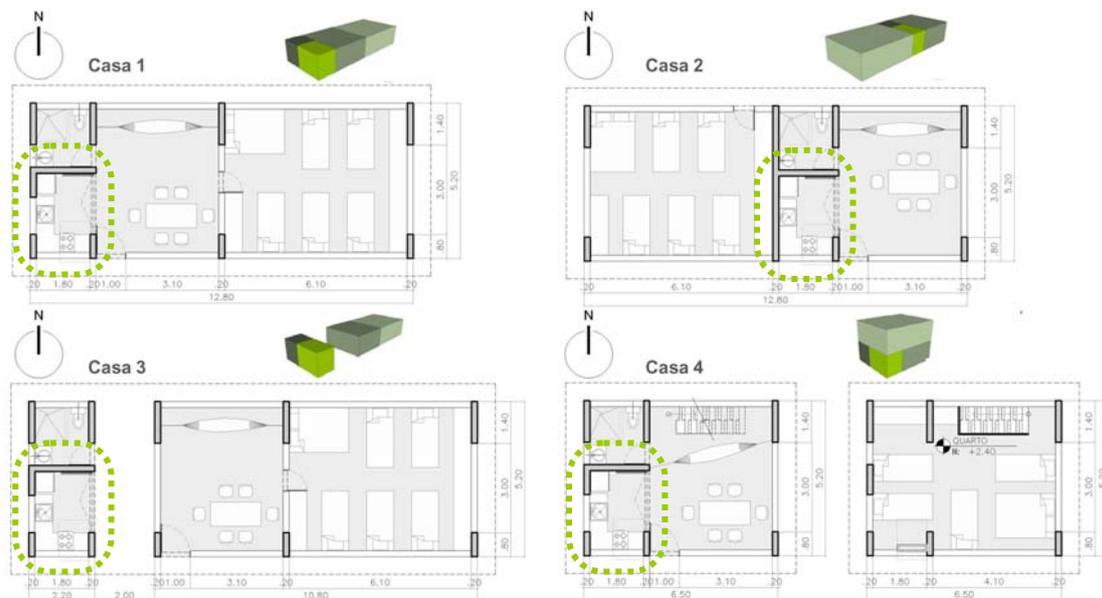


Figura 3: Variación en la localización de la cocina dependiendo del tipo de Casa

En la fase 4 se evaluó el efecto producido en la cocina, debido al aumento en el área de absorción de irradiación en 5 tipos de chimeneas solares. Una de las estrategias utilizadas, no tenía chimenea para tener una referencia del efecto producido las mismas (Figura 4). En esta fase se utilizó la cocina que tuvo el mejor comportamiento debido a la chimenea solar

encontrada en la fase 3. Finalmente, con la mejor configuración de parámetros de todas las fases, se hizo una evaluación de confort térmico adaptativo.

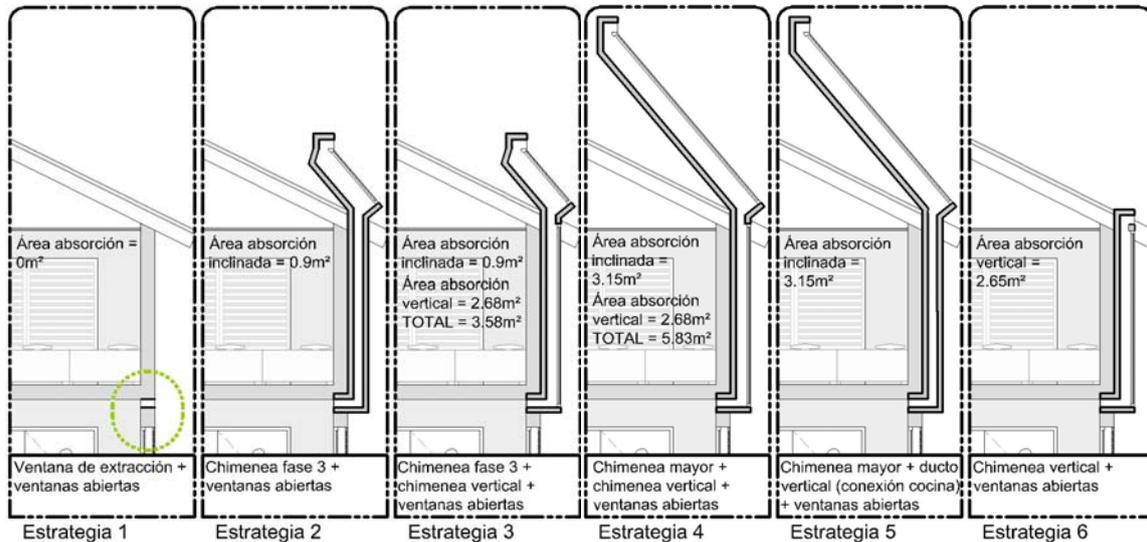


Figura 4: Estrategias Fase 4

2.3 Variables utilizadas en las evaluaciones de comportamiento

El comportamiento de la cocina se evaluó a través de las variables de “Temperatura de bulbo seco” [°C], cantidad de “renovaciones de aire por hora - ACH”, “Caudal de masa de aire” [kg/s], “Caudal de volumen de aire” [m³/s], y “Volumen de aire” [m³].

Debido a que en la fase 1 los valores de temperatura promedio diaria variaron muy poco, a partir de la fase 2 se incluyó la variable de “grados hora de enfriamiento” utilizando una temperatura base de 26°C. Esta variable muestra mejor las diferencias, debido a que es calculada con base horaria y no diaria. Para obtenerla, se deben sumar las diferencias de temperatura promedio de un espacio, hora a hora, para todo el día, cuando esta se encuentra por encima de una temperatura base (Goulart et al., 1998). La ganancia de calor por irradiación según la inclinación, se calculó con base en la variable “Surface Exterior Solar Incident” [W/m²].

Como en la fase 3 la transferencia de calor por radiación y convección se modificaba, la temperatura promedio se calculó con base a la “temperatura operativa” debido a que para su cálculo se considera la temperatura radiante $\frac{1}{2}$ junto con la temperatura del aire.

Con el fin de considerar las renovaciones producidas tanto por el aire exterior como por el aire procedente de otras zonas de la casa, la cantidad de “renovaciones de aire por hora - ACH” se calculó dividiendo el resultado de la suma de las variables “Volume Infiltration” y “Volume Mixing” por el volumen de la cocina.

3 RESULTADOS

Los resultados se mostraron a través de las 4 fases explicadas previamente

3.1 Fase 1: Día de proyecto y condición de viento

Si bien la temperatura en Quibdó presenta un comportamiento semejante a lo largo del año, la información adoptada en los días de proyecto permite apreciar diferencias dependiendo del

día que este siendo analizado. El solsticio de invierno fue el día que presentó las cocinas con temperaturas menores y mayor cantidad de ACH, y en el solsticio de verano se tuvieron las temperaturas mayores con la menor cantidad de ACH (Tabla 1).

	Temp. [°C]	ACH
Solsticio Verano	28,5	56,4
Equinoccio	27,6	57,5
Solsticio Invierno	27,1	58,1

Tabla 1: Promedio diario de Temperatura y ACH según el día de proyecto para las tres condiciones de viento

Para entender mejor cómo se comportaba la cocina, la chimenea, la sala de estar y el exterior a lo largo del día, la Figura 5 muestra los valores de temperatura para cada hora en cada uno de estos espacios a través de 4 tipos de líneas. En los 3 días de proyectos y las 3 condiciones de viento, se presentó el siguiente comportamiento: La mayor diferencia entre la temperatura de la chimenea y la cocina en relación al exterior se daba al medio día (12:00m), la mayor diferencia entre la temperatura de la chimenea en relación a la cocina ocurrió a las 13:00h y la temperatura máxima del exterior se alcanzó a las 15:00h. Aun cuando la cocina tuviera una temperatura promedio mayor que la sala de estar, a las 11:00h esta tenía una temperatura inferior en ciertas ocasiones. A pesar de que en promedio la chimenea estaba más caliente que el exterior, a las 07:00h ésta siempre estaba más fría y cuando no había viento esto sucedía antes de este horario. Aunque la temperatura promedio de la cocina fuera inferior a la de la chimenea, esta última tenía una temperatura inferior entre las 19:00-08:00h. En caso de que se tuviera viento, esa diferencia de temperatura ocurría en un período de tiempo menor (23:00–07:00h). En los momentos en que se estaba cocinando, la temperatura de la cocina aumentaba debido a las cargas internas de enfriamiento.

En cuanto a la influencia de la condición de viento, se detectó que la temperatura presentó pocas variaciones en función de esta; no obstante, la presencia del viento permitía aumentar significativamente la cantidad de ACH (Tabla 2). En el caso donde no se tenía chimenea, la temperatura no presentó variaciones en relación a la condición “sin viento” y la cantidad de ACH tuvo una pequeña disminución (0,4 ACH menos).

	Temp. [°C]	ACH
Viento Norte	27.6	71.8
Viento Sul	27.5	73.0
Sin Viento	27.9	42.4
Sin Viento ni Chimenea	27.9	42.0

Tabla 2: Promedio diario de Temperatura y ACH según la condición de viento para los tres días de proyecto

Para detallar mejor lo que sucedía en cada condición de viento, se hizo un balance del flujo de aire en todas las aberturas de la cocina para cada intervalo. La cantidad de aire que entraba se restaba del aire que salía: Un resultado negativo indica que entra más aire del que sale; por el contrario, un resultado positivo indica que el aire que sale es superior al que entra. Los gráficos de la Figura 5 poseen 4 barras verticales, representando el balance de flujo para cada una de las aberturas de la cocina: Puerta, ventana de extracción, ventana oeste y ventana sur. Adicionalmente se presenta el comportamiento de las temperaturas de la cocina, la chimenea, la sala de estar y el exterior a través de 4 curvas.

Cuando el viento venía del norte, la mayor parte del aire que entraba en la cocina procedía

de la sala de estar y salía predominantemente por la ventana oeste. En menor proporción salía por la chimenea y por la ventana sur. En algunos momentos existían flujos que venían del exterior, sin embargo su magnitud era tan pequeña que ni siquiera aparecían en el gráfico. Cuando el viento venía del sur, entraba aire tanto del exterior a través de la ventana sur, como de la sala de estar a través de la puerta, siendo mayor el flujo que entraba por la ventana. En cuanto a la salida, el aire salía por la ventana oeste y por la chimenea, siendo mayor la proporción de aire que salía por la ventana oeste. Finalmente cuando no se tenía viento, de madrugada el aire entraba solo por la chimenea y salía predominantemente por la puerta de la cocina. En el resto del día y la noche, el comportamiento se invertía: el aire entraba predominantemente por la puerta de la cocina y salía por la chimenea. En menor proporción, el aire entraba por las ventanas sur y oeste. Combinando el análisis del balance de flujo con los valores utilizados para los coeficientes de presión en cada abertura, se encontró que cuando el balance de flujo era negativo, los coeficientes de presión eran positivos (aire estaba siendo insuflado) y cuando el balance era positivo los coeficientes de presión eran negativos (aire era succionado).

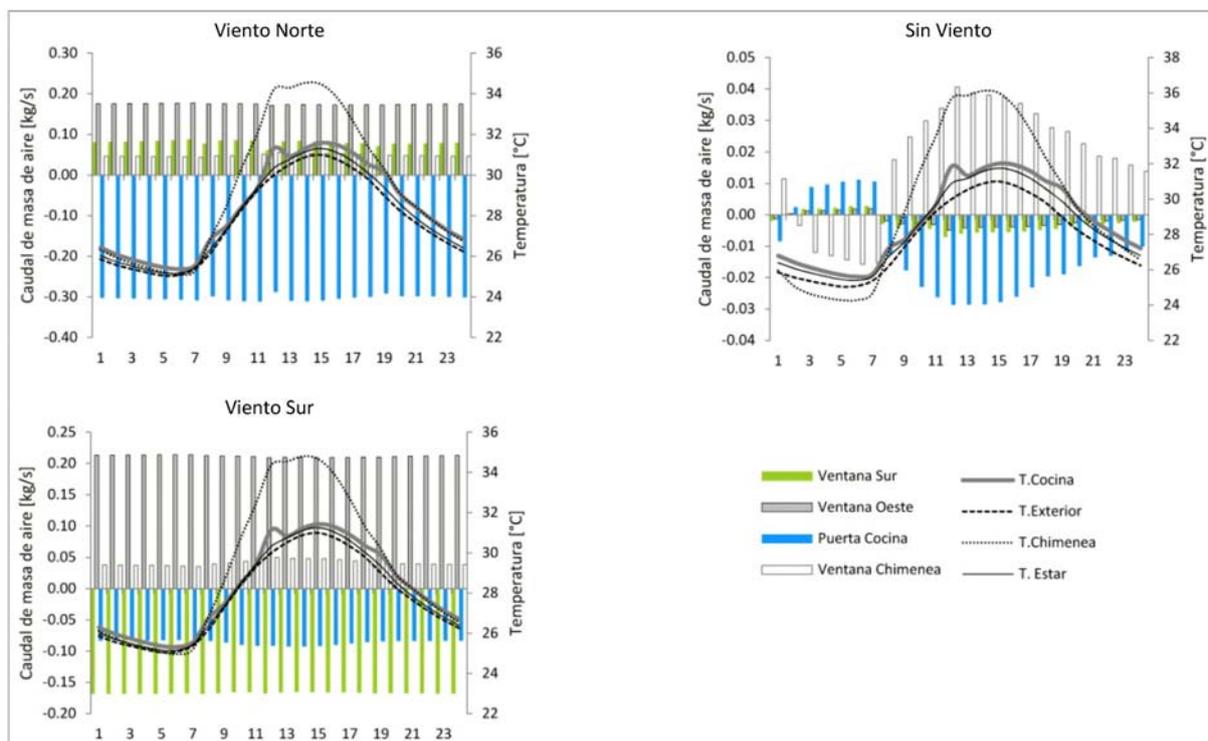


Figura 5: Balance de flujo en las aberturas de la cocina

Para corroborar las evidencias encontradas al hacer el balance de flujo en las aberturas de la cocina, se analizó la dirección del flujo en la puerta de la cocina que conectaba este espacio con la sala de estar. Un valor positivo en el eje “Y”, lado derecho de la [Figura 6](#), representa el flujo de aire que sale de la cocina para la sala de estar, mientras que un valor negativo indica el flujo que viene de la sala de estar para la cocina. Cuando el viento venía del norte, los flujos de aire que iban de la sala de estar para la cocina eran significativamente mayores que los flujos que salían de la cocina para la sala de estar. Cuando el viento procedía del sur, aunque los flujos que entraban de la sala de estar para la cocina continuaban siendo mayores, los flujos que salían de la cocina para la sala de estar aumentaban en relación a la condición de viento norte. Cuando no se tenía viento, los flujos en los dos sentidos eran inversamente

proporcionales: mientras más aire salía de la cocina para la sala de estar, más aire entraba de la sala de estar para la cocina. Al hacer una cuenta promedio restando la cantidad de aire que salía de la que entraba por la puerta de la cocina para cada condición de viento, se encontró que en la condición de viento norte entraban $0,2\text{kg/s}$ más que con el viento sur y $0,3\text{kg/s}$ más que cuando no se tenía viento. Debido a esto, la dirección de viento sur se mostró menos deseable que la de viento norte. Con viento sur, la cantidad de aire contaminado que se transfería de la cocina para el interior de la casa aumentaba, mientras que con viento norte era posible obtener un mayor aislamiento de la cocina con relación a la sala de estar.

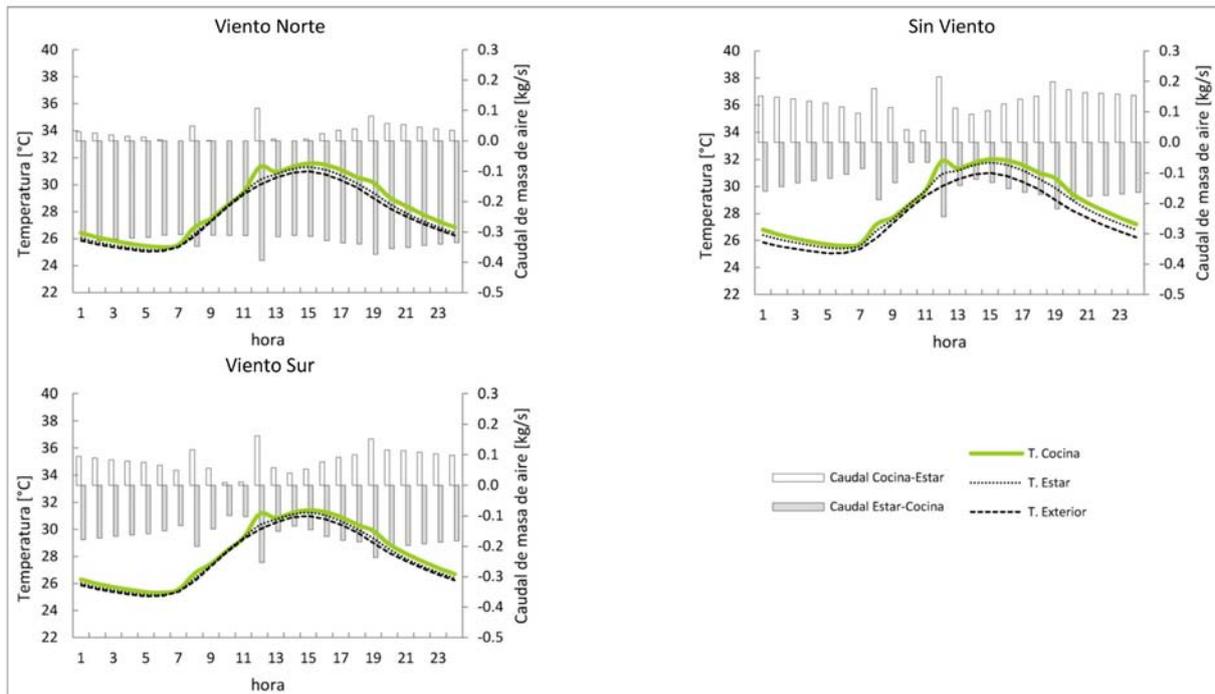


Figura 6: Dirección caudal entre cocina y estar

Para saber lo que estaba sucediendo en la chimenea en cuanto a la dirección del flujo de aire, se hicieron unos gráficos donde se presenta tanto el aire que sale como el que entra en cada intervalo. Un valor positivo en el eje “Y”, lado derecho, representa el flujo que sale de la chimenea y un valor negativo indica el flujo que regresa de la chimenea para la cocina (Figura 7). Cuando existía viento, viniera este del norte o del sur, y aun cuando la chimenea tuviera una temperatura menor que la de la cocina; el flujo de aire siempre iba de la cocina para la chimenea. Los valores negativos de los coeficientes de presión permitían que pasara esto. La presencia simultánea del viento y de la diferencia de temperaturas aumentaba la cantidad de aire que era extraído. Al medio día, momento en que se tenían los mayores diferenciales de temperatura de la cocina en relación al exterior, el “efecto chimenea” aumentaba y los flujos extraídos eran mayores. Ese aumento en el diferencial de temperaturas, se daba debido al aumento en las cargas de enfriamiento que sucedían en este período. Cuando no se tenía viento, la dirección del flujo se invertía de madrugada hasta las 07:00h, haciendo que el aire circulara de la chimenea para la cocina. A lo largo del día y la noche el flujo siempre iba de la cocina para la chimenea. En esta condición, la diferencia de temperatura de la chimenea en relación al exterior, era el factor que determinaba la dirección del flujo. Cuando la chimenea tenía una temperatura inferior a la del exterior, el aire entraba por la chimenea (flujos reversos); cuando la temperatura era superior a la del exterior, el aire salía.

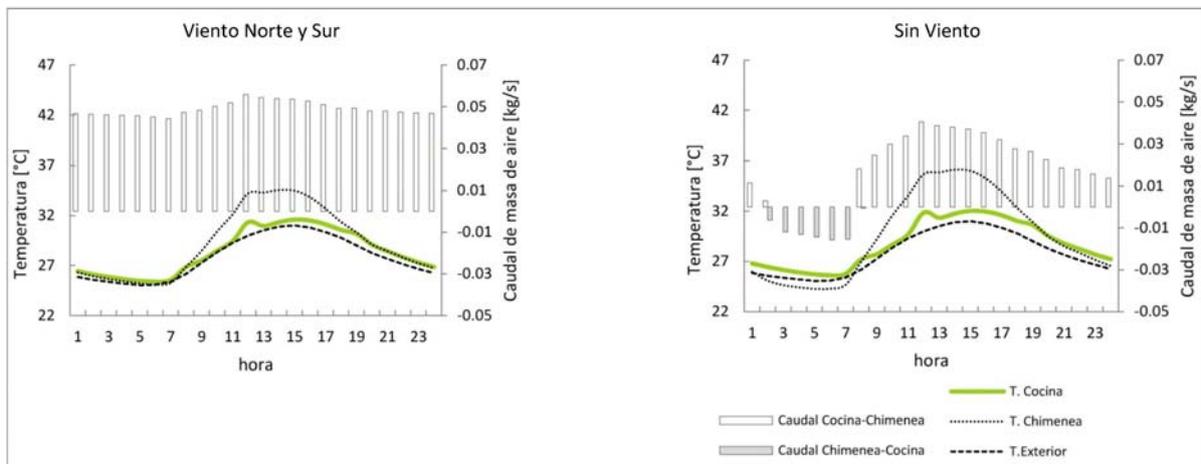


Figura 7: Dirección caudal entre cocina y chimenea

3.2 Fase 2: Inclinación de chimenea

Para analizar la ganancia de irradiación se utilizaron 17 ángulos de inclinación diferentes, para un techo con superficie igual a 1m². Las inclinaciones variaban entre 0° y 45°. Se detectó que la inclinación de 8,4° permitía obtener la mayor ganancia al hacer el promedio anual.

Para evaluar el efecto del ángulo de inclinación de la chimenea sobre el comportamiento de la cocina, se evaluaron las inclinaciones de 50°, 29,5° y 8,4°. La inclinación de 50° era el valor óptimo considerando la distancia entre las aberturas de entrada y salida de la chimenea y la ganancia de calor por irradiación para la latitud de Chocó, de acuerdo a [Mathur, Mathur y Anupma \(2006\)](#). La inclinación de 29,5° era la que permitía obtener la máxima ganancia de calor en un día de proyecto (invierno).

La cantidad de “grados hora de enfriamiento” no presentó variaciones entre las diferentes inclinaciones. En cambio, el valor de ACH, sí presentó variaciones dependiendo del valor de inclinación. Sin embargo, la magnitud de la diferencia obtenida fue muy pequeña. El mejor valor de inclinación de la chimenea era igual a 50°. En promedio para los 3 días de proyecto, esta inclinación producía 0,5 renovaciones de aire más que la peor inclinación igual a 8,4° ([Tabla 3](#)).

Cocina	Grados hora de enfriamiento	ACH
50°	52,3	42,6
29,5°	52,3	42,2
8,4°	52,3	42,1

Tabla 3: Comportamiento de la cocina en función del cambio en la inclinación de la chimenea

3.3 Fase 3: Localización de la cocina

Al verificar en qué localización de la planta arquitectónica la cocina presentaba mejor comportamiento debido al uso de la chimenea, se detectó que la cocina 3 era la que permitía obtener la menor cantidad de grados hora de enfriamiento (7,9 menos) y la mayor cantidad de renovaciones por hora (3,7 más). Por su parte, la cocina 2 presentó el peor comportamiento, debido al hecho de que esta era la cocina que tenía menor contacto con el exterior ([Tabla 4](#)).

	Grados hora de enfriamiento	ACH
Cocina 1	73.8	41.4
Cocina 2	73.8	40.9
Cocina 3	65.9	44.6
Cocina 4	73.7	43.4

Tabla 4: Comportamiento de la cocina en función de su localización en la planta arquitectónica

No obstante, aun cuando la cocina 3 permita obtener el mejor comportamiento, dicha superioridad no es alcanzada debido a la presencia de la chimenea solar. El contacto de la puerta de la cocina 3 con el exterior, hace que las renovaciones de aire aumenten debido a la ventilación generada por diferencia de temperaturas en esta abertura y no en la chimenea. Por el contrario, en la cocina 4 la mayor distancia vertical entre la abertura de entrada y salida de la chimenea hace que los flujos aumenten a través de la chimenea (Figura 8). Los valores positivos en las figuras representan los flujos que salen de la cocina a través de la chimenea; los negativos, por su parte, los que se devuelven de la chimenea. Debido a que el objetivo específico de esta fase era verificar cuál cocina presentaba mejor comportamiento gracias a la chimenea, se escogió la cocina 4 como la mejor entre todas las 4 opciones.

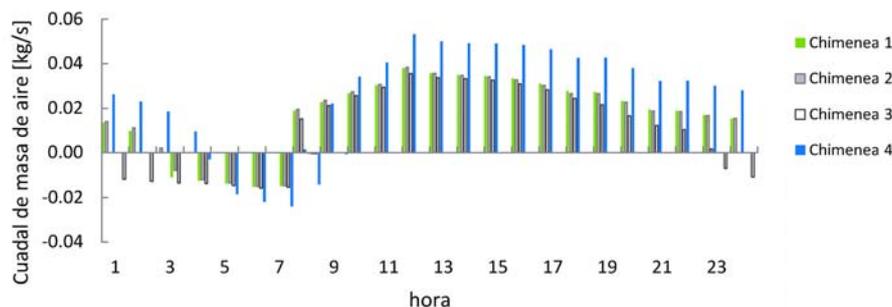


Figura 8: Caudal entre cocina y chimenea

3.4 Fase 4: Aumento del área de absorción de irradiación

Los valores de “grados hora de enfriamiento” y ACH no presentaron variaciones significativas debido al cambio de estrategia utilizada. La mejoría entre la peor estrategia y la mejor fue de 1,4 grados hora de enfriamiento menos (1,9% de mejoría) y 1,6 ACH más (3,7% de mejoría). La chimenea vertical (estrategia 6) permitió alcanzar el mejor desempeño en cuanto a la cantidad de ACH en comparación con las chimeneas inclinadas (Tabla 5). Para el promedio del día entero, se percibe que el aumento del área de absorción mejoraba el desempeño de ACH hasta un determinado límite; pasado ese límite, mientras mayor fuera esa área, el comportamiento era peor. De esta manera, de la estrategia 1 para la 2 y 3 hubo una mejoría, pero de la estrategia 3 para la 4 la cantidad de ACH disminuyó.

Se detectó que las estrategias tenían comportamientos diferentes dependiendo de la hora del día (Figura 9). En las horas con ganancia de irradiación, las mejores estrategias eran aquellas con mayor área de absorción (3, 4 y 5). Sin embargo, en el fin de la noche y la madrugada, las mejores eran aquellas con menor área de absorción (1, 2, 3 y 6). Al medio día, las estrategias con mayor área de absorción presentaban una cantidad significativa de flujos saliendo de la cocina. Sin embargo, esas mismas estrategias presentaban la mayor cantidad de flujos reversos en el fin de la noche y la madrugada (Figura 10). Esto puede deberse al aumento en la cantidad de vidrio en las estrategias con mayor área de absorción.

Considerando que a través del vidrio se pierde calor rápidamente en la noche, las superficies de las chimeneas con mayor cantidad de vidrio alcanzan temperaturas menores. De esta manera se producen flujos reversos, pues el aire contenido en la chimenea se enfría y alcanza una temperatura menor que la de la cocina.

Debido a las diferencias encontradas según la hora del día, se percibió que una evaluación hecha para el día entero podría no ser adecuada. Además la cocina no era ocupada durante todo el día. Por esto se hizo un análisis de cada estrategia para el período comprendido entre 07:00-20:00h, encontrándose que la estrategia con mayor área de absorción fue considerada la mejor (estrategia 4). Dicha estrategia presentó 3,6 ACH más que la peor estrategia (8,3% de mejoría). En cuanto a la cantidad de “grados hora de enfriamiento” la mejor estrategia fue la 5 (0,7 menos que la peor estrategia = 1,2% de mejoría) (Tabla 5).

Para evaluar si la mejor cocina estaba en condiciones de ofrecer confort térmico, se utilizó el método adaptativo propuesto por la Ashrae (2010). No obstante, fue necesario alterar la tasa metabólica de las personas que ocupaban la cocina equivalente a 1,6 MET. Cuando se utiliza este método, el valor máximo para esta variable no puede ser superior a 1,3 MET (personas en reposo). La localización fuera del rango en donde un 80% de las personas estaría en confort, como resultado de combinar la temperatura operativa de la cocina (30.1°C) con la temperatura ½ del aire para el mes de Junio (26,6°C); indica que aun cuando se disminuya la tasa metabólica, es imposible alcanzar confort térmico bajo estas condiciones (Figura 11).

Estrategia	Promedio día entero		Promedio período ocupación	
	Grados hora de enfriamiento	ACH	Grados hora de enfriamiento	ACH
1 = Ventana extracción sola	74.4	42.2	58.4	39.9
2 = Chimenea Fase 3	73.7	43.4	57.9	41.7
3 = Chimenea Fase 3 + Chimenea vertical	73.7	43.7	58.0	42.6
4 = Chimenea mayor + Chimenea vertical	73.0	42.9	57.8	43.5
5 = Chimenea mayor + Ducto vertical	73.1	43.0	57.7	43.0
6 = Chimenea vertical solamente	74.0	43.8	58.1	42.3

Tabla 5: Comportamiento de la cocina en función de la estrategia utilizada, según el período de tiempo considerado

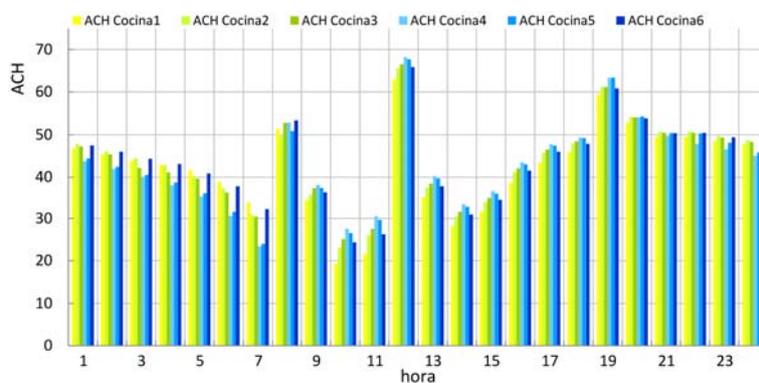


Figura 9: “Renovaciones de air por hora – ACH” de la cocina en función de la estrategia utilizada

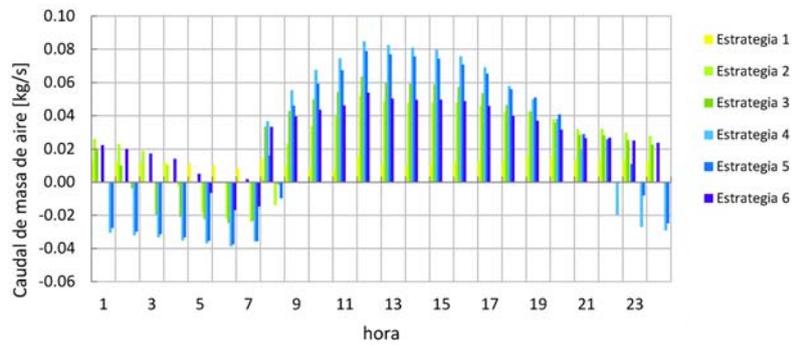


Figura 10: Caudal en la ventana de extracción de la cocina en función de estrategia utilizada

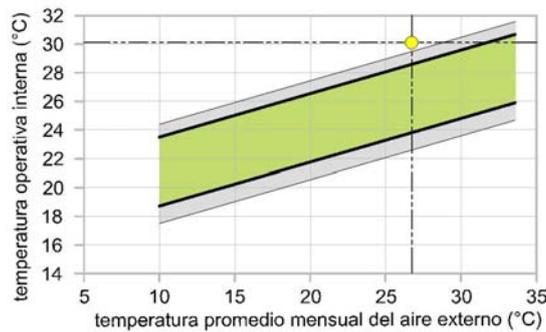


Figura 11: Evaluación de confort adaptativo - ASHRAE Standard 55-2010

4 CONCLUSIONES

A partir de las simulaciones realizadas en el presente trabajo utilizando el programa Energyplus, se identificó que usar chimeneas solares como única estrategia de acondicionamiento, no produjo mejoras significativas en la temperatura y la ventilación de cocinas residenciales localizadas en el clima cálido-húmedo de Quibdó. La máxima mejora obtenida fue de tan solo 3,6 ACH sobre un espacio de 14,9m³, pese a utilizar una gran área de absorción en la chimenea equivalente a 5,8m².

Las diferencias entre los resultados de esta investigación en relación a otros estudios, puede explicarse por el período de tiempo considerado en la evaluación de la chimenea solar. En los estudios precedentes, solo se consideran los períodos de mayor irradiación (medio día).

Para obtener comportamientos superiores es necesario incluir estrategias, que tengan mejor comportamiento en los momentos con baja o nula ganancia de irradiación en la chimenea.

Si bien a través de las simulaciones es posible anticipar el comportamiento de una estrategia, ahorrando el tiempo y el dinero que sería necesario invertir en caso de hacerse evaluaciones experimentales; se constata la necesidad de tener sentido crítico en todo el proceso de simulación. Los resultados obtenidos con este método deben evaluarse según la lógica de los fenómenos físicos estudiados, requiriendo un dominio de los mismos por parte de quien hace las simulaciones.

4.1 Fase 1: Día de proyecto y condición de viento

La presencia del viento, sin importar su dirección, permite mejorar el comportamiento de una chimenea. Los valores negativos de los coeficientes de presión en el techo de la casa, evitan que haya flujos reversos aun cuando la temperatura de la chimenea sea menor que la de la del exterior o la cocina. Sin embargo, es necesario considerar que el método adoptado para

calcular esos coeficientes en la presente investigación, posee un margen de error muy grande. Una variación en estos valores, podría anular el efecto chimenea por parte del viento

La dirección de viento norte demostró ser más conveniente, pues permite un mayor aislamiento de la cocina en relación al resto de la casa y su desempeño en cuanto a la temperatura y ACH es muy similar al presentado con viento sur. Cuando no existe viento, se debe tener precaución con los flujos reversos presentados en la madrugada.

Si se realizara una limpieza de la chimenea al final del día, estos flujos reversos podrían ser deseables pues el aire de menor temperatura permitiría enfriar las superficies de la cocina antes de la salida del sol. En caso de que no sea posible realizar esta limpieza, se puede explorar la aplicación de esta estrategia en espacios tales como los cuartos de una casa. Los cuartos no generan tanta contaminación y son habitados en la noche, pudiendo aumentar el confort de las personas mientras duermen.

El objeto “Horizontal Opening”, incorporado en la versión 7.0 del programa Energyplus, no representó adecuadamente el efecto chimenea a través de aberturas horizontales. En caso de que se desee trabajar con él, se debe verificar la dirección y el balance del flujo para garantizar que el fenómeno presente un comportamiento lógico.

4.2 Fase 2: Inclinación de chimenea

Tal como se demuestra en la bibliografía, la inclinación que permite tener mayor ganancia de irradiación, no coincide con la que genera el mejor comportamiento de la chimenea. La inclinación de 50° es el valor más adecuado para ser usado en una chimenea solar localizada en la latitud de Quidó.

4.3 Fase 3: Localización de la cocina

La cocina 4 posee la mejor localización que puede tener una cocina para mejorar su comportamiento gracias al uso de una chimenea solar. El aumento de la distancia vertical entre la abertura de entrada y salida de la chimenea, permite que sean obtenidas esas mejoras.

4.4 Fase 4: Aumento del área de absorción de irradiación

El aumento en el área de absorción de irradiación en una chimenea solar, siempre produce mejorías en el comportamiento de las renovaciones de aire cuando se considera solamente el período en el cual la cocina es utilizada. Cuando se considera el día entero, el aumento en esa área no siempre produce mejores resultados. Mayor área de absorción implica mayor cantidad de superficie vidriada, lo que favorece la pérdida de calor en la chimenea durante las horas de la noche. Cuando el aire de la chimenea alcanza temperaturas menores que las de la cocina, los flujos reversos se incrementan y las renovaciones de aire disminuyen.

Las mejorías en el comportamiento de la ventilación en la cocina derivadas del aumento en el área de absorción no son significativas. En un día entero, ocurren 1,6 renovaciones adicionales entre la mejor y la peor estrategia. Cuando se considera solamente el período en el cual la cocina se utiliza, se alcanzan 3,6 renovaciones adicionales.

Debido a que el programa Energyplus considera una “zona térmica” como un espacio próximo a un cubo, la modelación de un ducto como una zona térmica dentro de este programa (tal como se realizó dentro del presente trabajo para la chimenea), puede estar generando errores significativos en los resultados de las simulaciones.

REFERENCIAS

Ashrae - American Society of Heating, Refrigerating and Airconditioning Engineers. *Ashrae*

- Standard 55-2010: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta: American Society Of Heating, Refrigerating And Airconditioning Engineers, Inc., 2010.
- Ashrae - American Society of Heating, Refrigerating and Airconditioning Engineers. *2001 Ashrae Handbook - Fundamentals*. Atlanta, 2001.
- Bansal, N. K. et al. Modeling of window-sized solar chimneys for ventilation. *Building And Environment*, Volume 40, Issue 10, p.1302-1308, 2005.
- Chungloo, S.; Limmeechokchai, B. Application of passive cooling systems in the hot and humid climate: The case study of solar chimney and wetted roof in Thailand. *Building And Environment*, Volume 42, Issue 9, p.3341-3351, 2007.
- Eletrobras (Brasil). Procel. Eletrodomésticos. : <http://www.eletrobras.com/ELB/main.asp?TeamID=%7B32B00ABC-E2F7-46E6-A325-1C929B14269F%7D> 2012.
- Energyplus. Input Output Reference Manual – *The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output*. Version 7.0 2011: www.energyplus.gov.
- Gaviria, Alejandro Antonio Naranjo. Avaliação Por Simulação Computacional de Ventilação de Cozinhas Residenciais em Clima Quente e Úmido na Colômbia por meio de Chaminés Solares [*Dissertação*]; orientador, Roberto Lamberts – Florianópolis, SC, 2012. 211 p.
- Goulart, Solange V. G. et al. Dados Climáticos para Projeto e Avaliação Energética de Edificações para 14 Cidades Brasileiras. 2. ed. Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/ufsc, 1998. 345 p.
- Khanal, Rakesh; Lei, Chengwang. Solar chimney – A passive strategy for natural ventilation. *Energy And Buildings*, Volume 43, Issue 8, p.1811-1819, 2011.
- Khedari, J.; Boonsri, B.; Hirunlabh, J. Ventilation impact of a solar chimney on indoor temperature fluctuation and air change in a school building. *Energy And Buildings*, Volume 44, Issue 1, p.89-93, 2000.
- Ideam - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. *Atlas Climatológico de Colombia*. Imprenta Nacional de Colombia, 2005. 220p.
- Labee - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Universidade Federal de Santa Catarina. *Programa Computacional Analysis Bio, Versão: 2.2*.
- Mathur, J. et al. Experimental investigations on solar chimney for room ventilation. *Solar Energy*, Volume 80, Issue 8, p.927-935, 2006.
- Mathur, J.; Mathur, S.; Anupma. Summer-performance of inclined roof solar chimney for natural ventilation. *Energy And Buildings*, Volume 38, Issue 10, p.1156-1163, 2006.
- Neves, Letícia O.; Roriz, Maurício. Análise teórica do uso de chaminés solares para incrementar a ventilação natural em edificações. In: *ENCAC, 11., 2011, Búzios, Rj.Anais...* . Búzios, Rj: Encac, 2011. Tópico 4-13, p. 1 - 10.
- Nugroho, A. M.; Hamdan, M.. The development of solar chimney prototype for stack ventilation in Malaysia's single storey terraced house. *Architecture & Environment*, Volume 5, Issue 2, p.81-92, 2006.
- Ong, K. S.; Chow, C. C. Performance of a solar chimney. *Solar Energy*, Volume 74, Issue 1, p.1-17, 2003.
- Sakonidou, E. P. et al. Modeling of the optimum tilt of a solar chimney for maximum air flow. *Solar Energy*, Volume 82, Issue 1, p.80-94, 2008.
- Tiempo.com. Datos Históricos: Clima en Quidbo. Disponível em: <<http://clima.tiempo.co>>.
- Tno Building Research. Cp Generator.
- Yussof, W. F. et al. Enhancement of stack ventilation in a hot and humid climate using a combination of roof solar collect & vertical stack. *Building And Environment*, Volume 45, Issue 10, p.2296-2308, 2010.