Evolución de la temperatura interior de una vivienda en clima cálido-húmedo mediante simulación dinámica en diferentes situaciones de ventilación y sombreado

Evolution of indoor temperature in warm-humid climate housing through dynamic simulation in different situations of ventilation and shading

[1]Guillermo De-Ignacio-Vicens, [2]Silvia Soutullo-Castro, [3]Oscar López-Zaldívar y [3]Rafael-Vicente Lozano-Díez

[1] Universidad Politécnica de Madrid (España)
[2] CIEMAT (España)
[3] ETS de Edificación Universidad Politécnica de Madrid (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9632

1. INTRODUCCIÓN

1.1 EL CONFORT TÉRMICO EN CLIMAS CÁLIDOS Y HÚMEDOS

En los climas cálidos y húmedos, la selección de las estrategias de diseño resulta decisiva, y para ello es necesario el conocimiento del lugar y su microclima [1]. En general, se suele admitir que el confort térmico se favorece con construcciones aisladas, sin que influya que sean masivas o ligeras (lo que significa que la inercia térmica no sería determinante), en las que la ventilación sea importante y los huecos exteriores estén bien orientados y sombreados, siendo más adecuados los emplazamientos en lugares afectados por corrientes de aire [2].

Los factores críticos para el confort térmico en el clima cálido-húmedo son el movimiento del aire, constante para poder disipar las ganancias de calor solares e internas, y la exposición de los huecos de fachada, que deben estar protegidos del sol y, en la medida de lo posible, exentos de vidrio (dado que éstos aumentarían la temperatura interior al constituir trampas solares) [3].

1.2 VENTILACIÓN NATURAL PARA EL CONFORT TÉRMICO

El confort térmico define zonas de temperatura, de velocidad del flujo de aire y de niveles de humedad en los cuales los habitantes se sienten cómodos [4]. En el clima que nos ocupa, dado que hace calor durante el día y por la noche, la consecución del bienestar pasa fundamentalmente por la obtención de refrigeración, sea ésta natural o por medios mecánicos.

La ventilación natural de la vivienda se puede optimizar mediante las siguientes estrategias [5]:

- evaluar el potencial de ventilación en función del sitio
- aprovechar las fachadas expuestas a los vientos dominantes en los meses más cálidos
- proteger la piel del edificio de los rayos solares
- dimensionar adecuadamente los huecos para favorecer los movimientos de aire en los espacios interiores
- organizar la distribución interior con el fin de que la circulación del aire sea canalizada sin obstáculos

Las características del viento varían en función del medio ambiente, de la rugosidad del suelo, de la estratificación térmica y de la altura del lugar. El viento típico de un lugar se define por la combinación de su velocidad y de su intensidad de turbulencia, que pueden diferir de las del viento meteorológico [6].

Los efectos del viento vienen afectados por la altura del edificio, la porosidad, la geometría y la posición del edificio en relación con los obstáculos y su distancia a éstos. La desviación de los flujos de aire está también ligada a la turbulencia existente.

La velocidad del aire influye en los intercambios de calor por convección; en la vivienda se estiman adecuadas las velocidades de aire comprendidas entre 0.25 y 0.50 m/s. Sin embargo, en los lugares afectados por el tipo de clima objeto de nuestro estudio, el viento presenta velocidades bajas, en ocasiones menores que 0.25 m/s; y de acuerdo con la escala Beaufort, se trata del rango de velocidad definido como calmo [7].

Las velocidades de aire recomendadas para el bienestar térmico en las condiciones de Cuba se cifran por encima de 1.5m/s, pero esas velocidades son difíciles de obtener en el interior de las viviendas y pueden resultar incluso molestas [8].

La "American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers" (ASHRAE) proporciona indicaciones sobre las mejores tasas de renovación de aire ("Air Change per Hour" - ACH), las cuales dependen principalmente de las condiciones climáticas y de la tipología constructiva. Como regla general, entre 1 y 1.5 ACH es lo normal para mantener un ambiente saludable, y entre 3 y 5 ACH es un rango usual para situaciones de ventilación natural [9].

1.3 LA TEMPERATURA AMBIENTE INTERIOR

Dado que el parámetro de bienestar más directamente controlable por el usuario es el de la temperatura interior de la vivienda, parece conveniente considerar la evolución de dicha temperatura a lo largo del año, en función de las estrategias que el propio usuario pueda implementar, para la caracterización por parte de éste de las diferentes situaciones conducentes a un mejor nivel térmico de habitabilidad de la propia vivienda dentro de los condicionantes del clima cálido-húmedo propio de la zona del Caribe.

2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

En este trabajo se desarrolla un análisis y evaluación de los efectos que diferentes situaciones de ventilación natural, y de las estrategias de sombreado en combinación con éstas, provocan en la evolución de la onda térmica interior en función de la temperatura exterior, mediante simulación dinámica por ordenador.

Para la consecución de los objetivos propuestos se ha analizado la evolución horaria de la temperatura del aire interior bajo diferentes situaciones ambientales, haciendo uso del programa de simulación dinámica *Transient Energy System Simulation Tool* (TRNSYS 16.1). Este programa es modular y flexible, permitiendo diseñar sistemas complejos y modificar en cada

tiempo de paso las variables de entrada y las condiciones de contorno.

3. CASO DE ESTUDIO

3.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS

Los valores medios mensuales y anuales de la temperatura ambiente, así como las condiciones climáticas de La Habana pueden ser consultadas en las tablas 1 y 2 del anexo.

3.2 VIVIENDA OBJETO DE ESTUDIO

El estudio se particulariza en una vivienda representativa de las tipologías constructivas de La Habana (Cuba). Se trata de un edificio de tres alturas situado en el reparto Boyeros (figuras 1 y 2 del anexo), siendo la vivienda estudiada la correspondiente a una planta intermedia.

Tiene una superficie de 58m^2 y un volumen de 142m^3. Tiene tres fachadas exteriores, orientadas a este, sur y oeste respectivamente. El cuarto cerramiento es adyacente a una habitación del apartamento contiguo y a la caja de escalera, con la entrada a la vivienda.

Todos los cerramientos son de ladrillo; los correspondientes a las secciones A, B y C son muros de carga de 0.30m, y el resto de 0.15m. El acabado consiste en un repello por ambas caras de 15mm.

Los forjados son de hormigón armado de 0.12m de espesor. El acabado superior es el propio hormigón recubierto con lechada de cal, y el del suelo, baldosa hidráulica. La altura libre es de 2.45m.

Los huecos de ventana son de 1.20m x 1.60m, y están provistos de ventanas MIAMI metálicas fijas, con lamas que pueden regular la luz y proteger del asoleo y de las ráfagas de viento y lluvia. El hueco de la fachada sur es de 0.60m x 0.60m, acristalado y sin protección.

Los huecos de baño y cocina son de 0.65m x 0.55m y 0.60m x 1.15m respectivamente, ambos con persianas MIAMI fijas de madera. El patio de servicio y balcón en la fachada oeste es abierto y sobrevuela 1.20m de la fachada, al igual que el de la planta superior.

Las propiedades termofísicas de los materiales utilizados en la construcción de la vivienda pueden ser consultadas en la tabla 3 del anexo.

3.3 CONDICIONES DE SIMULACIÓN

Todos los casos se han simulado para dicha vivienda sin cargas internas. Ésta se ha modelado con dos zonas térmicas de 29m^2: la Zona_1, entre las secciones A y B, y la Zona_2, entre las secciones B y C.

Las hipótesis de partida son:

- Humedad relativa del 80% (media de La Habana)
- Infiltración constante de 0.24 ACH. Valor definido en los programas normativos españoles para bloques de viviendas desde 2006.
- Estrategia de ventilación nocturna.
- Ventilación diurna mínima de salubridad de 0.63 ACH (programas normativos españoles).
- Ventilación nocturna de 1.2, 4 y 8 ACH.
- Sombreado total de huecos durante el día (9 a 22 horas) con lamas cerradas, y abiertas 90º por la noche (23 a 8 horas).

Se han realizado las simulaciones teniendo como variables de salida las temperaturas interiores de ambas zonas térmicas (tabla 4 del anexo).

4. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN VENTILACIÓN Y SOMBREADO

4.1 RESULTADOS GENERALES

En la Zona_2 se alcanzan temperaturas medias ligeramente superiores a las de la Zona_1 (0.5ºC) en los casos sin sombra, invirtiéndose el resultado cuando los huecos están sombreados (0.4ºC en media). Por ello, en lo sucesivo se considerará la Zona_1 como objeto de estudio singular (tablas 5 y 6 del anexo)

Analizando las temperaturas interiores, se observa que sin sombreado sobre las ventanas (Caso_10, Caso_20 y Caso_30) se registran temperaturas medias superiores a las de los casos con sombreado (Caso_1, Caso_2 y Caso_3), como cabía esperar, variando las diferencias en media mensual y anual entre 1ºC y 3.7ºC dependiendo del número de renovaciones del aire interior, correspondiendo el Caso_1 y el Caso_10 a 1.2 ACH en ventilación nocturna; el Caso_2 y el Caso_20, a 4 ACH; y el Caso_3 y el Caso_30, a 8 ACH.

Sin embargo, esas temperaturas son siempre superiores a las medias mensuales de la temperatura exterior, lo que supondría un empeoramiento de las condiciones térmicas interiores de la vivienda, por lo que cabe preguntarse por el grado de significación de esas diferencias, sobre todo teniendo en cuenta que la amplitud de la onda de temperatura exterior es cuantitativamente importante en general.

Con objeto de analizar lo que ocurre durante las 24 horas del día, se han seleccionado dos días característicos: el 17 de enero como representativo de las condiciones de invierno, y el 23 de julio como representativo del verano. Esto permite ver las diferencias de temperatura hora a hora alcanzadas entre el exterior y el interior, así como la diferencia de temperatura interior entre los casos analizados.

4.2 CONDICIONES DE INVIERNO

La tabla 7 del anexo refleja la situación de las temperaturas máximas y mínimas interiores en los diferentes casos estudiados junto con los valores máximo y mínimo de la temperatura exterior para el día 17 de enero. Se reflejan además en la tabla las amplitudes de la onda térmica, los factores de amortiguamiento **f** de la onda térmica interior y el desfase Φ entre las ondas térmicas exterior e interior.

4.2.1 Libre asoleo de los huecos de fachada

En los casos Caso_10, Caso_20 y Caso_30, la diferencia de temperaturas máximas está dentro del rango de 1ºC, en tanto que las mínimas presentan una diferencia de 1.5ºC entre el Caso_10 y el Caso_30. Las amplitudes ($T_{máxima}$-T_{media}) están, respectivamente, en 1.2ºC, 1.4ºC y 1.5ºC, con una diferencia máxima de 0.3ºC entre el Caso_10 y el Caso_30 (ver anexos figura 3).

Dada la proximidad de los resultados entre el Caso_20 y el Caso_30 (0.5ºC de diferencia), podemos descartar este último caso, en concordancia con lo establecido anteriormente.

La temperatura máxima interior disminuye en 2ºC respecto de la temperatura máxima exterior en el nivel de ventilación normal, y en casi 3ºC en el nivel medio, y a su vez se da un aumento de la temperatura mínima de 2.5ºC sobre la mínima exterior en el primer caso, y de solo 1.6ºC en el segundo, por lo que será ventajosa una ventilación natural de nivel medio-alto aun en condiciones de invierno (figura 1).

Comparando con la evolución de la temperatura exterior, se observa la amortiguación de la onda térmica en el interior, que se sitúa algo por encima del 60%, con un desfase de dos horas respecto del máximo de la onda térmica exterior, como consecuencia de la inercia térmica del edificio.

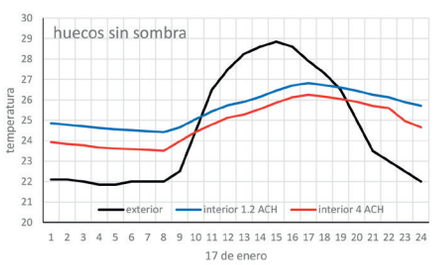


Figura 1. Evolución de la temperatura diaria

Como la oscilación de temperatura es pequeña (T_{max}-T_{min} en torno a 2.5ºC), es representativa la temperatura media del día, que se sitúa ligeramente por debajo de los 25ºC para el Caso_20, esto se estima como medianamente confortable.

4.2.2 Huecos en sombra

En los casos con sombreado de huecos durante el día, Caso_1, Caso_2 y Caso_3, con niveles de ventilación de 1.2 ACH, 4.0 ACH y 8.0 ACH, respectivamente, se observa que las temperaturas máxima y mínima difieren en menos de 0.5ºC, por lo que se considera no significativo el nivel de ventilación en este supuesto (Ver anexos figura 4).

Al establecer la gráfica de comparación entre la evolución de la temperatura exterior y la interior durante 24 horas, con la misma situación sin sombreado de los huecos, en régimen de ventilación natural nocturna normal (Figura 2), la temperatura mínima interior coincide prácticamente con la mínima exterior, y la máxima interior está algo más de 5ºC por debajo de la exterior, lo que conduce a una diferencia notable en la amplitud de la onda térmica interior respecto de la exterior.

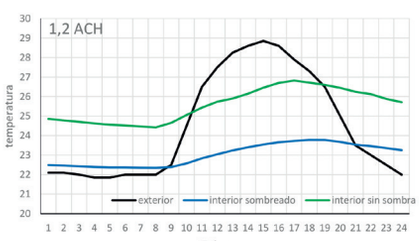


Figura 2. Evolución de la temperatura diaria

La oscilación de la temperatura interior es menor que 1.5ºC con un factor de amortiguamiento de la onda térmica del 80%, lo que significa que la temperatura en la vivienda es sensiblemente constante a lo largo de las 24 horas, manteniéndose en torno a los 23ºC de la temperatura media, con un nivel de confort considerado aceptable.

El máximo de la temperatura interior se produce a las 18 horas, con un desfase de tres horas respecto al máximo exterior (15 horas), valor aceptable por cuanto la temperatura exterior y la interior coinciden en torno a las 21 horas.

Esta situación es ventajosa frente a la mejor disposición obtenida cuando no hay sombreado de los huecos, en el más favorable nivel medio-alto de ventilación, con casi 25ºC de temperatura media diaria y todavía entre 2ºC y 3ºC de temperatura por encima del caso en estudio a lo largo del día (Figura 3).

En las gráficas conjuntas de los seis casos (Figura 4) se aprecian las diferencias de

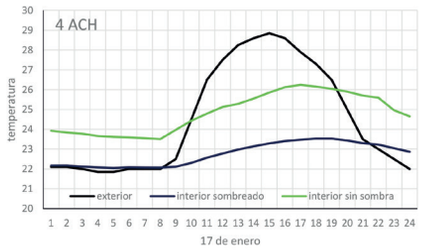


Figura 3. Evolución de la temperatura diaria

comportamiento de la temperatura interior a lo largo del día. Tomando como términos de comparación los casos 1 (sombreado con ventilación natural normal) y 20 (sin sombra y ventilación media-alta), la diferencia entre las temperaturas máximas de ambos casos está por encima de los 2ºC, situándose en 26.2ºC la temperatura máxima interior en el Caso_20, en tanto que la máxima en el Caso_1 es de 23.8ºC.

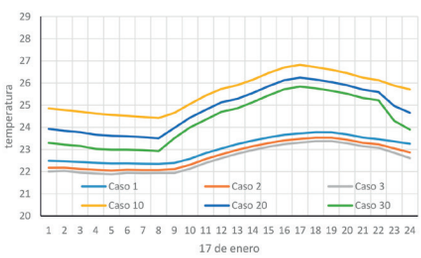


Figura 4. Comparación entre temperaturas interiores con huecos en sombra durante el día (Caso_1, Caso_2 y Caso_3) y sin sombra (Caso_10, Caso_20 y Caso_30) para diferentes niveles de ventilación

Lo mismo sucede con la temperatura mínima nocturna, que frente a los 23.5ºC del Caso_20, en el Caso_1 es de 22.4ºC, por lo que los valores de temperatura máxima y mínima en este caso son ambos claramente más confortables.

Más significativa es la diferencia en las amplitudes y amortiguamiento de las ondas térmicas en estudio. En el Caso_1, la amplitud se ha reducido a la mitad y el amortiguamiento crece del 60% al 80% respecto del Caso_20, con lo que la temperatura interior resulta casi constante.

4.3 CONDICIONES DE VERANO

En la tabla 8 del anexo se detalla la situación de las temperaturas interiores en los diferentes casos analizados, junto con la temperatura exterior, para el día 23 de julio que hemos considerado como representativo.

4.3.1 Libre asoleo de los huecos de fachada

Considerando las situaciones de partida en las que no se ha contemplado ningún sombreado, Caso_10, Caso_20 y Caso_30 (niveles de ventilación de 1.2 ACH, 4.0 ACH y 8.0 ACH respectivamente), la diferencia de temperaturas máximas entre cada caso es inferior a 1ºC, siendo de 1.6ºC entre el Caso_10 y el Caso_30, mientras que las mínimas presentan una diferencia de menos de 2ºC entre cada uno de ellos (3.1ºC entre el Caso_10 y el Caso_30). Las amplitudes (Tmáxima – Tmedia) en los tres casos están entre 1.5ºC y 2.5ºC, con una diferencia máxima de 0.8ºC entre el Caso_10 y el Caso_30 (Figura 5).

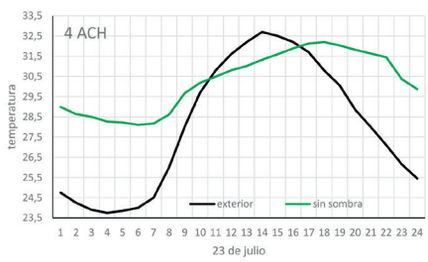


Figura 5. Evolución de la temperatura diaria

Analizando las condiciones de confort interior de la vivienda en verano, descartamos el Caso_10, por dar una temperatura máxima superior a la máxima exterior; y dado que la diferencia de temperaturas a lo largo del día entre el Caso_30 y el Caso_20 está en torno a 1ºC o menos, tomaremos como caso de referencia el Caso_20 (ventilación media-alta) en la comparación con la evolución diaria de la temperatura exterior (Ver anexos figura 5).

El amortiguamiento de la onda térmica interior es del 56%, con una amplitud de 2.1ºC frente a los 4.5ºC de amplitud de la onda exterior, resultando una temperatura media diaria de 30.1ºC, y una temperatura del orden de 5ºC por encima de la temperatura nocturna exterior, por lo que las condiciones interiores de temperatura son claramente no confortables, aun con ventilación media-alta.

4.3.2 Huecos en sombra

Al considerar la situación de sombreado durante el día (9:00 a 21:00), el caso intermedio (Caso_2, ventilación media-alta) es ventajoso respecto del Caso_1 y poco diferente del Caso_3 (diferencia menor que 1ºC a lo largo del día), por lo que consideraremos el Caso_2 como de referencia en condiciones de verano (Figura 6).

En el Caso_2 el amortiguamiento de la onda térmica interior es del 75%, con una amplitud de 1.1ºC frente a los 4.5ºC de amplitud de la onda exterior, resultando una temperatura media diaria de 27.2ºC, y una temperatura del orden de 2ºC por encima de la temperatura nocturna exterior, por lo que la temperatura interior se mantiene muy estable las 24 horas del día, dentro

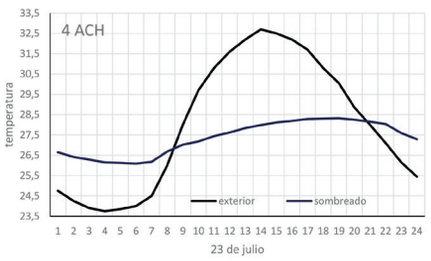


Figura 6. Evolución de la temperatura diaria

de un rango que puede considerarse como relativamente confortable, sobre todo durante la noche (Ver anexos figura 6).

El desfase respecto de la onda exterior en este supuesto es de 5 horas, con lo que el máximo de la temperatura interior coincide prácticamente con el valor medio de la temperatura media ambiente, en torno a 28ºC, y se produce en un momento de claro descenso de la temperatura exterior, aspecto este muy ventajoso.

5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1 CONDICIONES DE INVIERNO

- Sin sombreado en los huecos, y dada la proximidad de los resultados entre los niveles de ventilación de 4 y 8 ACH, podemos descartar este último caso, de acuerdo con lo establecido en los niveles de ventilación natural adecuados para viviendas.
- Comparando las temperaturas máxima y mínima interiores con las exteriores, en los niveles de ventilación normal y media-alta, resulta ventajosa una ventilación natural de nivel medio-alto aun en condiciones de invierno.
- Al efectuar la comparación de las temperaturas interiores con la evolución de la temperatura exterior, se observa una amortiguación de la onda térmica en el interior por encima del 60%, y como la oscilación de temperatura es pequeña, es representativa la temperatura media del día, que se sitúa ligeramente por debajo de los 25ºC para el nivel de ventilación medio-alto, situación que puede estimarse como medianamente confortable.
- Al sombrear huecos durante el día, se observa que, tanto la temperatura máxima, como la mínima, difieren en menos de 0.5ºC entre los tres niveles de ventilación considerados, por lo que se considera no significativo el nivel de ventilación en este supuesto.
- Cuando se sombrean los huecos, y aun en régimen de ventilación natural y nocturna normal, existe una reducción notable en la amplitud de la onda térmica interior respecto de la exterior, con lo que la temperatura en la vivienda es sensiblemente constante a lo largo de las 24 horas día, manteniéndose en torno a los 23ºC de la temperatura media, con un nivel de confort que se puede considerar aceptable.

5.2 CONDICIONES DE VERANO

- En libre asoleo de los huecos en fachada, en el régimen de ventilación normal de 1.2 ACH se da una temperatura máxima interior superior a la máxima exterior, por lo que se debe tomar como referencia el nivel de ventilación medio-alto en verano.
- El amortiguamiento de la onda térmica interior, de poco más del 50%, junto con la amplitud de la onda interior, dan como resultado una temperatura media diaria de 30ºC y una temperatura interior del orden de 5ºC por encima de la temperatura nocturna exterior, por lo que las condiciones interiores de temperatura son claramente no confortables, aun con ventilación media-alta.
- Con sombreado, el nivel de ventilación media-alta es ventajoso respecto del nivel de ventilación normal, por lo que hay que considerarlo como referencia.
- En este caso, el amortiguamiento de la onda térmica interior es del 75% con una amplitud de 1ºC, por lo que la temperatura interior se mantiene muy estable en torno a los 27ºC de temperatura media diaria, lo que puede considerarse como relativamente confortable de día, pero no así por la noche.

6. CONCLUSIONES

- La simulación dinámica, día a día y hora a hora, a lo largo de los doce meses del año, permite discriminar y cuantificar las mejoras aplicables en las estrategias de ventilación natural y sombreado, en las diferentes situaciones de invierno y verano, para las condiciones climáticas de La Habana (Cuba).
- De los resultados obtenidos se desprende que un nivel de ventilación medio-alto, correspondiente a 4 ACH, es aconsejable no solo en condiciones de verano, sino también en condiciones de invierno.
- Como ya establecimos anteriormente [10], son fiables los valores de amortiguamiento y desfase de la onda térmica interior obtenidos mediante simulación dinámica, lo que permite considerar como válidos los resultados de temperatura interior en orden a las condiciones de habitabilidad de la vivienda.

REFERENCIAS

[1] Tablada, A.; De Troyer, F.; Blocken, B.; Carmeliet, J.; Verschure, H. (2009) On natural ventilation and thermal comfort in compact urban environments – the Old Havana case. Building and Environment, Vol.44, Issue 9. Pp 1943-1958. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.01.008
[2] Ugarte, J. (2006). Guía Bioclimática. Construir con el clima. Fundación Príncipe Claus para la Cultura y el Desarrollo. Instituto de Arquitectura Tropical. San José (Costa Rica)
[3] W.F.M. Yusoff, E. Salleh, N.M. Adam, A.R. Sapian, M.Y. Sulaiman. Enhancement of stack ventilation in hot and humid climate using a combination of roof solarcollector and vertical stack. BUILDING AND ENVIRONMENT 45 (2010)
[4] T. Kubota, D.T.H. Chyee, S. Ahmad. The effects of night ventilation technique on indoor thermal environment for residential buildings in hot-humid climate of Malaysia. ENERGY AND BUILDINGS 41 (2009)
[5] Ugarte, J. (2013). Guia De Arquitectura Bioclimatica II. Fundación Príncipe Claus para la Cultura y el Desarrollo. Instituto de Arquitectura Tropical. San José (Costa Rica)
[6] Zhijia Huang, Zhouqin Wu, Mengqi Yu, Yameng Dong. (2017) The Measurement of Natural Ventilation in Huizhou Traditional Dwelling in Summer. Procedia Engineering. Volume 205, Pages 1439-1445, ISSN 1877-7058, https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.350.
[7] Pérez Castro, H, Flores, J, & López, A. (2013). Análisis de la ventilación inducida en un espacio habitable, mediante un sistema de Chimenea Hidro-Solar. Revista de la construcción, 12(2), 127-138. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2013000200010
[8] González Couret, Dania. (2004) La arquitectura bioclimática en Cuba. Instituto de Arquitectura Tropical. Editorial On Line 2015. Publicado en: Energía y tú, Nº25 (Enero-Marzo).
[9] Giraldo Castañeda, W. Alberto Herrera, A. (2017) Passive ventilation and thermal confort for public housing in ecuatorial climate. Ingeniería y Desarrollo, Vol. 35, N.1. (Enero-junio 2017) http://dx.doi.org/10.14482/inde.35.1.8944
[10] De Ignacio Vicens, Guillermo; Soutullo Castro, Silvia; López-Zaldívar, Oscar; Lozano-Diez, Rafael; Verdú, Amparo. On thermal inertia and insulation of buildings in warm-humid climate. Anales de Edificación. Vol. 4, Nº 1, 14-26 (2018). ISSN. 2444-1309. Doi: http://dx.doi.org/10.20868/ade.2018.3730

MATERIAL SUPLEMENTARIO

https://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/9632-1.pdf