



MODELO DINÁMICO DE UNA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE CONSTRUCCIONES SOSTENIBLES EN COLOMBIA

Mario Álvarez García [*], Francisco Javier Fernández García[**]

[*] Alumno; [**] Tutor

uo230574@uniovi.es , javierfernandez@uniovi.es

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

Una solución a las severas consecuencias del calentamiento global actual es la sustitución de materiales convencionales a partir del diseño de construcciones sostenibles. Bajo este enfoque, el presente trabajo evalúa un modelo dinámico de dos sistemas constructivos diferentes: el primero, utilizando materiales convencionales, y el segundo, basado en su posible sustitución con un material sostenible, el bambú Guadua. El estudio se ha realizado en Colombia, país pionero en el uso de este material en otros sectores industriales debido a su abundancia y rápido crecimiento en el área.

El diseño de los módulos se ha realizado utilizando Sketchup 2017, mientras que para la simulación energética se ha utilizado el software EnergyPlus a partir de la interfaz o plug-in OpenStudio, la cual permite calcular diferentes parámetros basándose en la geometría de las celdas y en las propiedades de los materiales.

Los resultados de la simulación han permitido evaluar el rendimiento energético y los parámetros de confort térmico para cada celda a partir de dos situaciones de cálculo: la primera, para estudiar el comportamiento de los materiales que forman los bloques sin ningún tipo de carga, y la segunda, en la que se añaden cargas debidas a la ocupación.

Se evidencia que, debido a las propiedades térmicas de la Guadua y las condiciones climáticas de Colombia, este material es un excelente sustituto de aquellos que son convencionales, sirviendo la presente investigación de soporte para impulsar el desarrollo de viviendas más sostenibles en Colombia.

ABSTRACT

A solution to the severe consequences of current global warming is the substitution of conventional materials based on the design of sustainable buildings. With this approach, this work evaluates a dynamic model of two different construction systems: the first, using conventional materials, and the second based on its possible replacement with a sustainable material, Guadua bamboo. The study has been carried out in Colombia, a pioneer country in the use of this material in other industrial sectors due to its abundance and fast growth in the area.

The cells were designed using Sketchup 2017, while the EnergyPlus software was used for the energy simulation using OpenStudio interface or plug-in, which allows calculating different parameters based on the geometry of the cells and the properties of the materials.

The simulation results have allowed evaluating the energy performance and the thermal comfort parameters for each cell from two calculation situations: the first, to study the behaviour of the materials that make up the blocks without any type of load, and the second, in which loads due to occupation are added.

It is evident that, due to the thermal properties of Guadua and the climatic conditions of Colombia, this material is an excellent substitute for those that are conventional, serving this research as support to promote the development of more sustainable households in Colombia.



1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, las severas consecuencias del calentamiento global en el medioambiente y en la sociedad moderna [1,2] han incrementado la necesidad de un enfoque global hacia el análisis relacionado con la energía. En este sentido, se están desarrollando investigaciones en el uso de la energía [3,4,5,6], con la sustitución de materiales convencionales y el diseño de construcciones sostenibles, desde las primeras etapas de modelado hasta la ocupación de la vivienda [7].

Para la toma de decisiones en el campo energético, la simulación de edificaciones es primordial. Las herramientas de simulación de energía se utilizan para el análisis de rendimiento energético y el confort térmico de sus ocupantes, permitiendo abordar e integrar una gran cantidad de variables en sus cálculos para generar de forma integral un modelado dinámico, las cuales, las más importantes son los datos climáticos y las propiedades termofísicas de los elementos de construcción.

Así, el clima juega un papel fundamental ya que afecta directamente la carga térmica y por lo tanto, al rendimiento energético de la construcción [8]. Es necesario tomarlo en cuenta para la búsqueda del confort térmico en los espacios para la vida cotidiana, y así favorecer el equilibrio ecológico, la responsabilidad social y la eficiencia económica. Por otro lado, la sustitución de materias primas convencionales (cemento, ladrillo, etc) busca la sostenibilidad como criterio principal en la elección de los materiales cuyas propiedades van a condicionar los resultados de la simulación. Uno de estos materiales sostenibles es la Guadua Angustifolia Kunth (GAK), un género de plantas de la subfamilia del bambú, utilizado desde tiempos milenarios para diversas aplicaciones, entre ellas, se ha propuesto recientemente como materia prima en el sector de la construcción [9,10], en especial, para los países del sur como es el caso de Colombia, en donde su abundancia y rápido crecimiento lo convierten en un sustituto ideal de materiales convencionales.

El bambú Guadua presenta propiedades estructurales sobresalientes [11]: es resistente,

liviano, flexible, antisísmico, posee una elevada velocidad de crecimiento, es económico, biodegradable, y es usado como captador de CO₂.

Sin embargo, el uso de la Guadua en Colombia se ha limitado prácticamente a la artesanía, y tan sólo existen proyectos pioneros de construcciones entre los años 2015 y 2017 basados en procesos industrializados de GAK, pero que poseen diferentes características de forma, tamaño, uso y localización, razón por la cual no es posible medir en ellos aspectos cuantitativos ni comparativos de comportamiento térmico. Tampoco existen normas ni estándares internacionales para su utilización, y la información científica de aspectos energéticos como el comportamiento térmico de la Guadua en la industria es limitada (actualmente China es líder en procesos industrializados del bambú).

Así, más recientemente [12] se ha llevado a cabo el diseño de una fase experimental de dos sistemas constructivos del mismo tamaño, uso, forma y localización (Colombia) pero contruidos con materiales diferentes: el primero, más convencional con ladrillo, y el segundo, basado en materiales sostenibles como la Guadua (Figura 1), con el fin de monitorizar y evaluar las viviendas que tengan unos mismos materiales constructivos.



Figura 1. Diseño arquitectónico del módulo de cemento y ladrillo convencional (izquierda) y del módulo fabricado con bambú Guadua (derecha)

Este tipo de viviendas han sido diseñadas para ser ocupadas por personas de bajos niveles socioeconómicos del país. La vivienda de bajo coste basada en el uso de recursos locales con bajo impacto ambiental apunta a mitigar el creciente déficit de vivienda y el impacto de la construcción convencional.



A partir de esta fase experimental, el objetivo de la investigación es realizar un modelo dinámico de los dos sistemas constructivos, tradicional y de Guadua, planteados en el modelo experimental en Bogotá (Colombia) que permita contrastar resultados y que valga de apoyo en los estudios del comportamiento térmico.

El trabajo incluye la descripción de los materiales y métodos, resultados y análisis de los mismos. Para ello se utilizará el Software EnergyPlus, el cual será el motor de la simulación para realizar el análisis comparativo del comportamiento térmico de los dos modelos, determinando las características y ventajas de cada uno. EnergyPlus es un programa de simulación de nueva generación en el que se apoya OpenStudio, una interfaz gráfica que cuenta con un plug-in para SketchUp que se utilizará para representar el diseño en 3D de cada uno de los sistemas constructivos. Finalmente, se exponen las conclusiones sobre el confort térmico de ambas soluciones y recomendaciones para impulsar el desarrollo de viviendas más sostenibles en Colombia.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Módulos constructivos

Se presentan dos módulos constructivos para experimentación de condiciones de bienestar térmico en viviendas construidas en Colombia (figura 1): el primero, convencional, de ladrillo, y el segundo, de un material sostenible como es el bambú Guadua.

2.1.1. Descripción de los módulos experimentales

La planta arquitectónica de los módulos cuenta con unas medidas de 2,43 x 2,43 m y una fachada lateral de 2,40 m. El diseño corresponde a un modelo a escala real que pretende simular la construcción típica de vivienda de un barrio colombiano. A continuación, se presentan los planos del diseño para las celdas (Figura 2) correspondientes a la planta arquitectónica y a la fachada lateral.

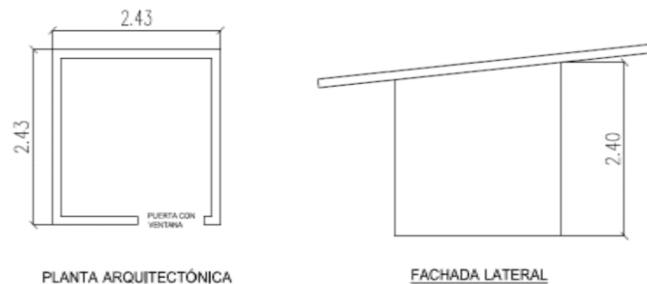


Figura 2. Plano del diseño de los módulos

En cuanto a los detalles constructivos, los módulos experimentales presentan los siguientes detalles constructivos, resumidos en la tabla 1, para cada una de las partes diseñadas relativas a suelo, muros, techo, puertas y ventanas.

Tabla 1. Características de la construcción de los dos sistemas constructivos

| PARTES | MÓDULO DE GUADUA | MÓDULO CONVENCIONAL |
|----------------------|--|---|
| Suelos | Placa maciza de hormigón | |
| Fachadas | Guadua laminada de 3cm de espesor | Ladrillo hueco de arcilla cocida, espesor 10 cm, columnas y vigas de hormigón |
| Techos | Teja metálica trapezoidal, cielo raso en Guadua laminada, espesor 1,5 cm | Teja de asbesto cemento, sin cielo raso |
| Puertas con ventanas | Marco metálico, vidrio crudo espesor 3 mm | |

2.1.2 Propiedades termofísicas

Estas incluyen, por lo general, la densidad (kg/m^3), la conductividad térmica ($\text{W/m}\cdot\text{K}$) y el calor específico ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$), todas ellas clave para el proceso posterior tanto del modelado como del diseño. También se incluye la absorptividad como variable esencial relativa al comportamiento de los materiales a la radiación solar.

La mayoría de los valores se han obtenido de la base de datos de HULC [20], a excepción de las del bambú Guadua, el cual no está incluido en el software.



Tabla 2. Propiedades termofísicas de los materiales

| Material | Densidad kg/m ³ | Conductividad térmica W/m.K | Calor específico J/kg.K | Absortividad |
|------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------|
| Acero Galvanizado | 7850 | 52 | 460 | 0,20 |
| Asbesto Cemento | 2100 | 1,5 | 1000 | 0,85 |
| Ladrillo hueco | 930 | 0,395 | 1000 | 0,65 |
| Bambú Guadua [13 y 14] | 624 | 0,0975 | 1270 | 0,50 |
| Hormigón | 2400 | 2,3 | 1000 | 0,65 |
| Vidrio | 2500 | 0,8 | 800 | 0,30 |
| Aluminio | 2700 | 230 | 880 | 0,15 |

2.1.3. Situación de las celdas

Los bloques reales se localizan en la ciudad de Bogotá (Colombia), con Latitud 4.70° Norte y Longitud 74.13° Oeste. Se encuentran situados en el tejado del Centro de Tecnologías para la Construcción y la Madera.

Actualmente, el proyecto ya ha sido ejecutado y los módulos se encuentran en fase de monitorización, lo cual va a permitir analizar su comportamiento y posteriormente poder comprobar y comparar los resultados.

2.1.4. Condiciones climáticas

Colombia es un país que se caracteriza por un clima tropical. La elevación promedio es de 2548 m.s.n.m. Los impactos del cambio climático juegan un papel clave en la variabilidad del clima de Bogotá, destacando los Fenómenos del Niño y de la Niña [15]. Particularmente, la ciudad de Bogotá posee un clima moderadamente frío de 14°C en promedio con variaciones de temperatura durante las diferentes épocas del año. El frío se acentúa durante los períodos de lluvia y, en contraste, en días muy soleados la sensación térmica puede incrementarse por encima de los 25°C. Exceptuando los meses de lluvias intensas de marzo, mayo, septiembre y noviembre, durante el resto del año la precipitación es menor.

La humedad está cercana al 80% pero las velocidades del viento, especialmente durante los

meses de enero, febrero, julio y agosto, hacen que la ciudad permanezca un poco más seca.

2.2 Modelo de cálculo

Para establecer el modelado dinámico de los dos sistemas constructivos propuestos se han establecido tres etapas (figura 3), modificadas a partir del enfoque propuesto por [16] para resolver problemas de confort térmico, acorde a las condiciones y recursos disponibles actuales.

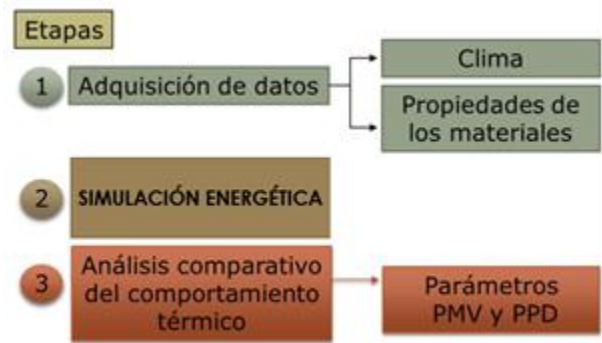


Figura 3. Etapas del modelado [16]

2.2.1. Geometría del modelo

El diseño en 3-D de los módulos se ha realizado utilizando Sketchup en su versión 2017, para posteriormente convertirlo en un archivo de entrada a EnergyPlus utilizando la interfaz o plugin de OpenStudio.

Las medidas y demás datos constructivos se han descrito previamente en el apartado 2.1.1.

En base a las características constructivas según el tipo de espacio de la celda (techo, muros, suelo y puerta con ventana) y a los materiales utilizados de la tabla 1, la representación de los modelos geométricos incluye los diferentes espacios de construcción, separados por tipo de superficie, condición de frontera, zona térmica y tipo de construcción.

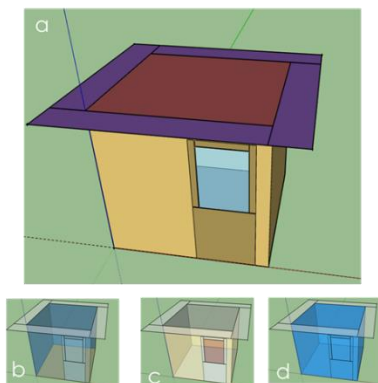


Figura 4. Modelado geométrico en SketchUp 2017 de las celdas
 a) color por tipo de superficie b) color por tipo de frontera, c)
 color por número de zonas térmicas d) color por tipo de
 construcción

2.2.2. Composición de los cerramientos

Las características constructivas se detallan en la tabla 1.

2.2.3. Datos climáticos

Los datos meteorológicos se obtuvieron en el sitio web del software EnergyPlus, basados en la Organización Meteorológica Mundial y con un formato de archivo de datos climáticos tipo .epw. El estudio de las variables (temperatura, humedad y parámetros de confort térmico) se ha evaluado durante un año, con estudios de frecuencia temporal mes a mes y específicos, hora a hora.

Se han tomado de esta base de datos las condiciones externas de la zona de estudio a lo largo de todo el año 2019, midiendo para ello la temperatura de bulbo seco t_{bs} (°C), evidenciando variaciones significativas en los máximos y mínimos de este valor directamente relacionado a los cambios de la temperatura durante el día y la noche, como se observa en la tabla 3, en la que se incluyen valores medios mensuales y el promedio anual, así como las temperaturas mínimas y máximas registradas.

La evaluación de una semana elegida de manera aleatoria permitió reconocer que durante todo el año se presentan diferenciaciones a pesar de mantenerse una temperatura ligeramente estable (figura 5).

Tabla 3. Valores mensuales de t_{bs}

| Mes | t_{bs} (°C) | | |
|-------|---------------|--------|--------|
| | Media | Mínima | Máxima |
| Ene | 12,9 | 0,4 | 21,0 |
| Feb | 13,5 | 3,5 | 22,6 |
| Mar | 13,5 | 1,4 | 22,1 |
| Abr | 13,6 | 0,6 | 22,1 |
| May | 13,9 | 4,0 | 22,0 |
| Jun | 13,3 | 3,4 | 20,0 |
| Jul | 12,8 | 5,0 | 19,6 |
| Ago | 12,9 | 2,4 | 20,8 |
| Sep | 13,2 | 4,5 | 21,0 |
| Oct | 13,0 | 3,0 | 21,2 |
| Nov | 13,2 | 4,0 | 21,1 |
| Dic | 12,5 | 2,5 | 21,4 |
| Prom. | 13,2 | 0,4 | 22,6 |

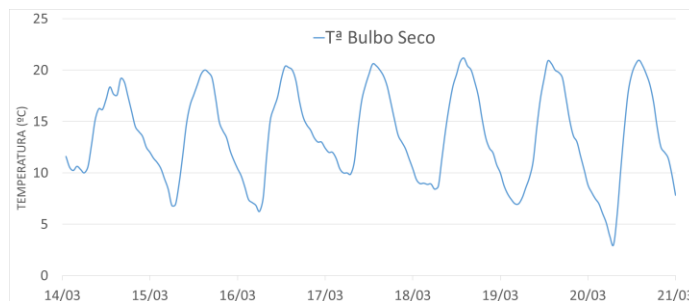


Figura 5. Condiciones exteriores de temperatura

2.2.4. Condiciones de cálculo

Con el programa EnergyPlus se ha realizado el cálculo de los parámetros basándose en la geometría de las celdas. La ley de balance de energía hace que sobre el aire asociado a cada espacio o local que se defina en el módulo se pueda escribir una ecuación diferencial, que rige la evolución de la magnitud que se desea controlar observando lo que sucede dentro del recinto y en el contorno.

Los módulos están libres de cargas internas, pudiendo existir infiltraciones de entrada de aire del exterior. El valor de las mismas se ha establecido en 0,7 renovaciones/hora. El cálculo se realizará en oscilación libre, sin introducción de ningún tipo de equipo o sistema de climatización. Este modo de simulación es el más adecuado para la evaluación pasiva de los bloques. Se observará la evolución de las variables que afectan al bienestar térmico en el interior.



El proceso de simulación se ha realizado para dos situaciones de cálculo:

- ✓ CASO 1: El modelo se resuelve sin ocupación en las celdas, con el objetivo de disponer de un caso que permita contrastar los resultados obtenidos con las mediciones experimentales, las cuales se van a hacer sin ocupación. Es interesante en este supuesto observar el comportamiento de la temperatura sin la carga debida a las personas, obteniéndose un perfil de temperatura interior de los bloques.
- ✓ CASO 2: En el segundo caso, se resuelve el modelo incluyendo carga de ocupación en los módulos, con la intención de analizar los parámetros del bienestar térmico. Para ello, se fija un índice de ocupación según el CTE en 20 m²/persona, un nivel de actividad en 1,2 MET correspondiente a una permanencia normal en la vivienda, y un perfil de ocupación variable, propia de una persona residente en la zona de estudio (figura 6).

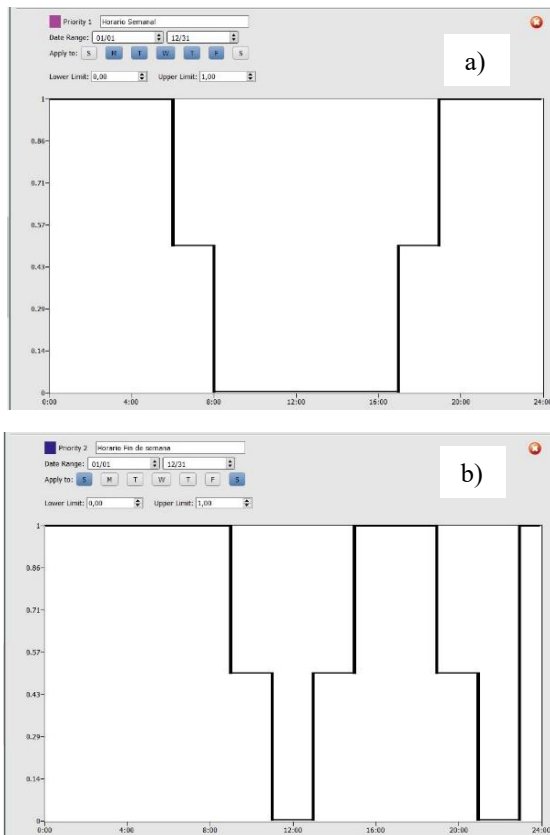


Figura 6. Actividad de ocupación en las viviendas de Colombia a) perfil horario de lunes a viernes b) perfil horario del fin de semana

Los resultados más interesantes de la simulación son la temperatura y humedad del aire interior, así como los valores del bienestar térmico que se explican en el siguiente apartado.

Otro parámetro realmente importante es la temperatura operativa, la cual tiene en cuenta las temperaturas superficiales de las paredes, techo y suelo de los módulos, afectando directamente al confort térmico, pues considera el efecto de la temperatura media radiante considerando el intercambio de calor por convección con el aire y por radiación con el interior de las paredes [19].

Todas las unidades de medida se consideran en el sistema internacional (S.I.).

2.2.5. Parámetros de confort térmico

A partir de los datos obtenidos para cada modelo se han comparado los resultados en términos de comportamiento térmico.

Los índices térmicos PMV (Voto Medio Previsto o Voto Medio Estimado) y PPD (Porcentaje Previsto de Insatisfechos o Porcentaje Estimado de Insatisfechos) propuestos por Fanger y objeto de la norma técnica UNE EN ISO 7730: 2006 [17] tienen en cuenta todos los factores objetivos que influyen en la sensación térmica general del cuerpo y el confort térmico. Este último consiste en un balance de energía influenciado por las variables que afectan a la transferencia de calor.

Los cálculos relacionados con el confort térmico (PMV y PPD) se pueden efectuar directamente desde la interfaz de OpenStudio Application, a partir de introducción en este software de la Measure "Predicted Mean Vote" y su respectiva configuración.

El PMV se calcula empleando las ecuaciones desde (1) a (4).

$$\begin{aligned}
 PMV = & (0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028) \cdot [(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \\
 & \cdot (5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a) - 0,42 \\
 & \cdot ((M - W) - 58,15) - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) \\
 & - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \\
 & \cdot f_{cl} \cdot ((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4) - f_{cl} \cdot h_c \\
 & \cdot (t_{cl} - t_a)
 \end{aligned}$$

(1)



$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \{3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)\} \quad (2)$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} & \text{para } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{para } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (3)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 \cdot I_{cl} & \text{para } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \\ 1,05 + 0,645 \cdot I_{cl} & \text{para } I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \end{cases} \quad (4)$$

Una vez determinado el valor del PMV, se ha calculado el PPD (figura 7) utilizando la ecuación (5). El PPD estima el número de individuos térmicamente insatisfechos en un grupo de personas, considerando la satisfacción en aquellos que se sienten térmicamente neutrales, ligeramente calurosos o ligeramente frescos [17].

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2} \quad (5)$$

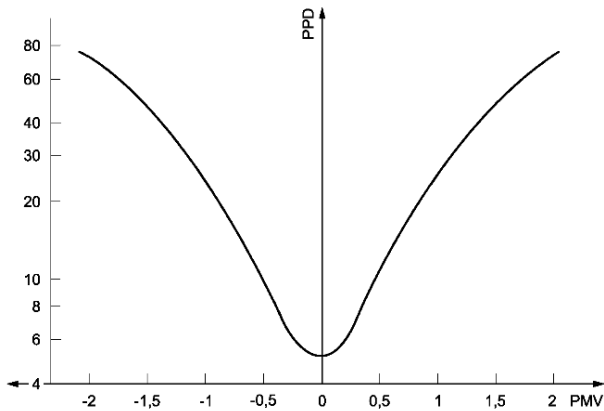


Figura 7. PPD en función del PMV [18]

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caso 1 – Celdas sin ocupación

El parámetro comparado para este supuesto ha sido únicamente la temperatura del aire interior en los módulos, ya que otros datos que se pueden obtener para clarificar el comportamiento que van a tener los bloques bajo estas condiciones, como la humedad relativa, no aportan mucho más puesto que tan sólo depende de la temperatura interior y de las infiltraciones de aire, al tener ausencia de cargas latentes por no haber ocupación.

De esta forma, se ha obtenido un perfil de temperatura debido únicamente a las cargas de transmisión y las infiltraciones.

Los resultados se han obtenido hora a hora durante el tiempo definido correspondiente a un año, aunque para una representación más clara se ha continuado con el periodo aleatorio mostrado para visualizar los cambios de temperatura en el exterior (figura 5).

En la figura 8 se muestran las variaciones horarias de la temperatura interior durante la semana comprendida entre los días 14 y 20 de marzo, y también el promedio diario de esa ventana de tiempo. Se registra un comportamiento de las curvas para las dos opciones evaluadas muy diferente, con unas fluctuaciones mucho más marcadas para la celda convencional, con temperaturas máximas de 36 °C y mínimas de 10 °C. La imagen inferior de la figura 8 confirma esta baja constancia del parámetro durante un tiempo prolongado. Sin embargo, la evolución de la temperatura interior en el bloque de Guadua sigue una oscilación repetitiva, con diferencias que se encuentran siempre en el intervalo de los 10 y los 26 °C.

Se puede ver claramente el comportamiento tan desigual entre ambos módulos comprobando el periodo redondeado en la figura 8. Si a esta temperatura interior se le compara con la ambiente (figura 5), las diferencias para el caso del bloque convencional llegan a ser de 17 °C para la misma hora, disminuyendo a los 5 °C en la Guadua.

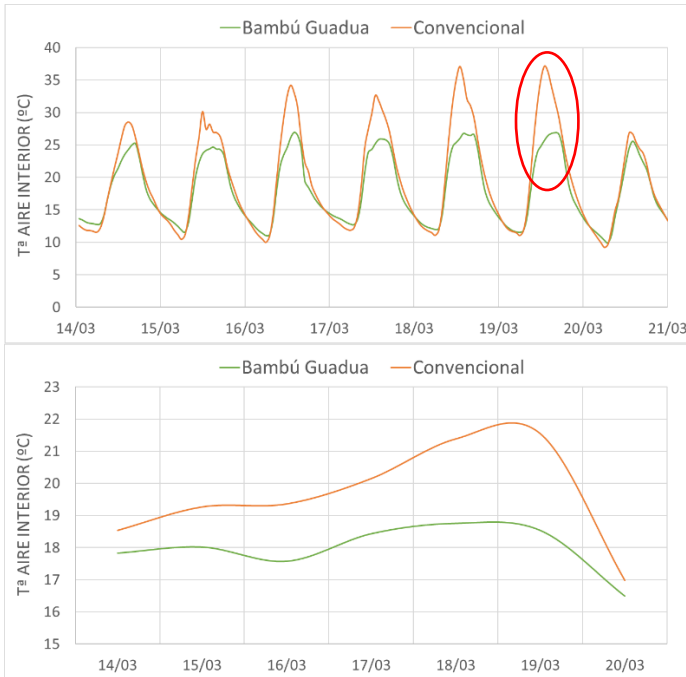


Figura 8. Evaluación de la temperatura del aire interno de las celdas objeto de estudio en el periodo comprendido entre el 14 y el 20 de marzo. Variación horaria (imagen superior) y media diaria (imagen inferior)

Estos resultados son favorables para la opción sostenible ya que en Colombia se reporta que, durante la noche en los días calurosos, los habitantes prefieren dormir en hamacas fuera de la vivienda, puesto que la temperatura interna es mayor que la externa [12]. Así, con la Guadua se logra minimizar ese incremento de temperatura generado en el interior de la vivienda, debido principalmente a las propiedades térmicas de este material [11], de tal forma que permite que esa sensación térmica no sea tan angustiosa.

Para verificar los cambios registrados durante el día y la noche con una mayor exactitud y visión, se han seleccionado aleatoriamente dos días tipo que cuenten con el mismo perfil de ocupación (figura 6).

En la figura 9 se analizan ambas celdas para el caso del 21 de enero, un mes en el que las diferencias de temperatura son máximas, y los resultados muestran que el módulo de Guadua se calienta menos en las horas de día y el enfriamiento durante la noche tiene una pendiente muy poco pronunciada y no muy prolongada: hay unas

diferencias máximas de unos 15 ºC, al contrario que el módulo convencional, que se calienta más en el día y tarda más tiempo en enfriarse durante la noche.

Por otro lado, en la figura 10 se evalúa la temperatura interior para el día 16 de julio, correspondiente a un mes donde las diferencias entre máximos y mínimos son menores. Los resultados obtenidos de temperatura del aire en el interior de los bloques confirman lo analizado en el primer caso, que la celda de Guadua se calienta menos que la convencional. Hay unas variaciones entre el máximo y el mínimo de unos 12 ºC a diferencia de la convencional, que aumenta 5 ºC más, aproximadamente.

Analizando lo anterior, el aire es claramente más fresco para el modelo de Guadua que para el convencional, en el que se observa una mayor inestabilidad. Por lo tanto, y a pesar de que es un material de origen biológico que puede quedar más afectado por factores atmosféricos (sol, lluvia o humedad del ambiente), se podría decir que el comportamiento de los diferentes materiales es más favorable para las celdas hechas de bambú Guadua.

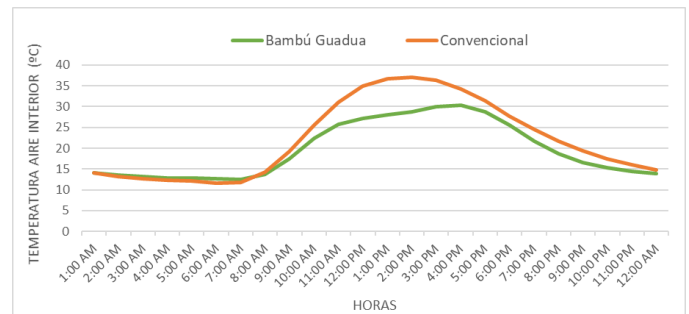


Figura 9. Evaluación horaria de los cambios de temperatura del aire interno durante el día 21 de enero para ambas celdas

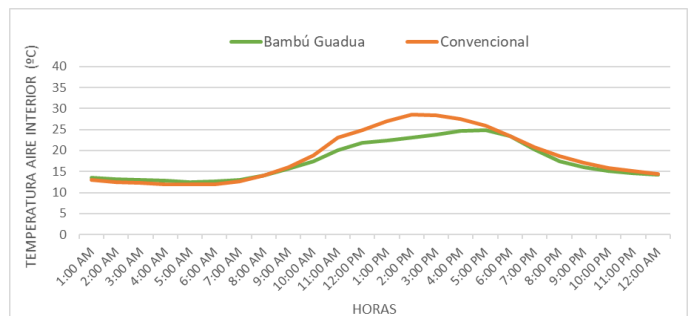


Figura 10. Evaluación horaria de los cambios de temperatura del aire interno durante el día 16 de julio para ambas celdas



Un parámetro a comentar en este apartado es la temperatura operativa, la cual tiene una enorme importancia en el bienestar térmico de las respectivas celdas. La evolución registrada es idéntica a la curva de temperatura interior, aunque por lo general es levemente menor para el caso de la Guadua, y mayor para la convencional, debido a las mayores diferencias existentes en este bloque entre las temperaturas interior y ambiente.

3.2 Caso 2 – Celdas con ocupación

Para el cálculo y exportación del software de los parámetros de confort térmico se ha partido de la segunda situación de cálculo en la que ya existen cargas debidas a la ocupación, como es lógico. Además, también se presentan para este caso la temperatura interior y la humedad relativa, puesto que depende de la carga latente interior debida a las personas.

Bajo este supuesto se han registrado nuevamente las temperaturas del aire en el interior de los módulos en los días tipo seleccionados.

En la figura 11 se puede observar la temperatura interior y la humedad relativa del 21 de enero bajo cargas de ocupación.

La comparativa de temperaturas interiores entre ambos casos establece diferencias máximas en las horas de máxima ocupación de, aproximadamente, 0,5 °C, levemente mayores en la Guadua, es decir, la ocupación de estos módulos genera un mayor incremento en celdas construidas con este material. Sin embargo, este parámetro sigue generando un comportamiento mucho más inestable en celdas convencionales.

También en la misma figura se observa la curva debida a la humedad relativa, en la que hay menores fluctuaciones entre máximos (80 %) y mínimos (30 %) con la Guadua, mientras que la mínima en los módulos convencionales llega al 15 %. Algo que añadir en este punto es el mayor aumento de humedad en el interior de estas últimas celdas en esa ventana horario de máxima ocupación.

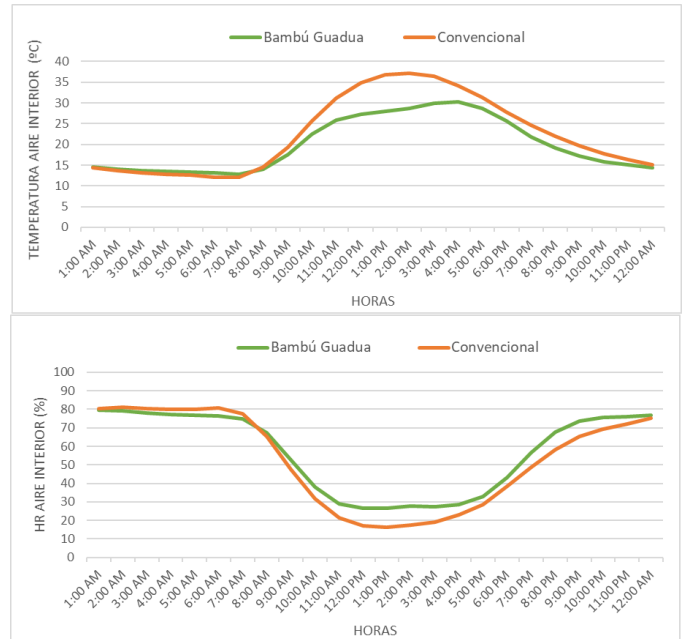


Figura 11. Evaluación horaria de los cambios de temperatura del aire interno (imagen superior) y de humedad relativa (imagen inferior) durante el día 21 de enero para ambas celdas

En el segundo día tipo evaluado se repiten las mismas variaciones (figura 12): la diferencia entre la temperatura interior para ambos casos sigue siendo de unos 0,5 °C, y continúa siendo mayor en la Guadua, aunque su comportamiento sigue siendo prácticamente lineal, a diferencia de la convencional. Para el caso de la humedad, la presencia de personas en esta celda provoca aumentos de hasta un 6 %, siendo estos más bajos para la Guadua, cuyos mínimos se alcanzan, según la figura 12, con un descenso más sostenido.

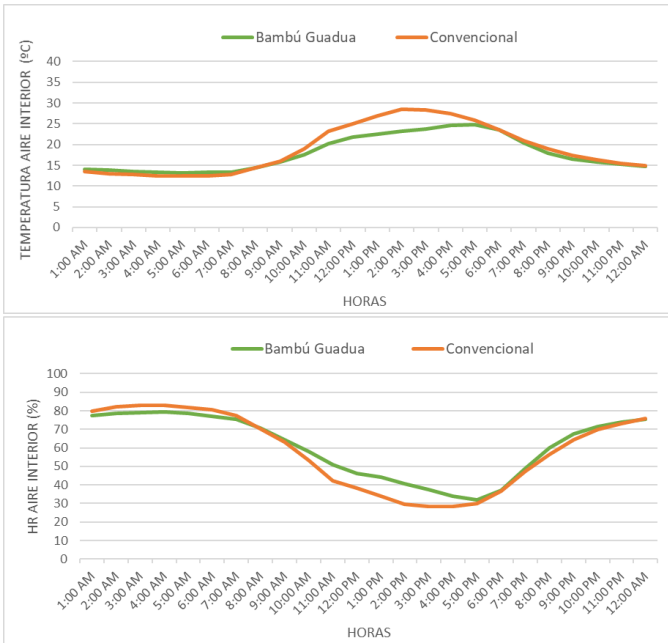


Figura 12. Evaluación horaria de los cambios de temperatura del aire interno (imagen superior) y de humedad relativa (imagen inferior) durante el día 16 de julio para ambas celdas

Tabla 4. Valores de referencia para el bienestar térmico global presentados en la UNE EN ISO 7730:2007

| PUNTUACIÓN | SENSACIÓN TÉRMICA |
|------------|-------------------|
| +3 | Mucho calor |
| +2 | Bastante calor |
| +1 | Algo de calor |
| 0 | Neutra |
| -1 | Algo de frío |
| -2 | Bastante frío |
| -3 | Mucho frío |

El comportamiento de la simulación energética en donde se evalúan las variables del confort térmico (PMV y PPD) de ambas celdas se muestra en la figura 13, evidenciando las fluctuaciones entre los máximos y mínimos comentadas, durante la semana comprendida entre los días 14 y 20 de marzo.

Si se hiciera un análisis en términos de vivienda, y tomando en consideración los valores de referencia para el bienestar térmico global de la UNE EN ISO 7730:2007 (tabla 4) [17], se dispone que los resultados exportados de ambos modelos muestran que existe un alto porcentaje de horas en el cual las personas se encuentran en condiciones de incomodidad térmica.

La evaluación horaria del PPD muestra unos resultados para la celda de Guadua más que aceptables, con la salvedad del periodo que va de junio a septiembre, en el que se observa incomodidad térmica. En la celda convencional este periodo se amplía. Además, durante el resto del año se siguen viendo valores desfavorables en cuanto a confort térmico.

Este análisis es proporcional al del PMV, en el que entre los meses que van de enero a mayo y de octubre a diciembre se visualiza, para el caso del módulo de Guadua, una sensación térmica que se acerca mucho a 0, es decir, una situación neutra (tabla 4). El periodo de mayor insatisfacción térmica que se comenta previamente muestra unos máximos de -0,5 y unos mínimos que llegan a -4. La tendencia muestra que la sensación térmica es claramente de frío, puesto que en el bloque convencional la evolución es idéntica, con la salvedad que se registra una mayor inestabilidad, con valores más cambiantes, que alcanzan valores máximos de 2,5 y mínimos de -2,5 en los periodos de mayor sensación de calor, y que llegan hasta -5 en ese intervalo más desfavorable de frío.

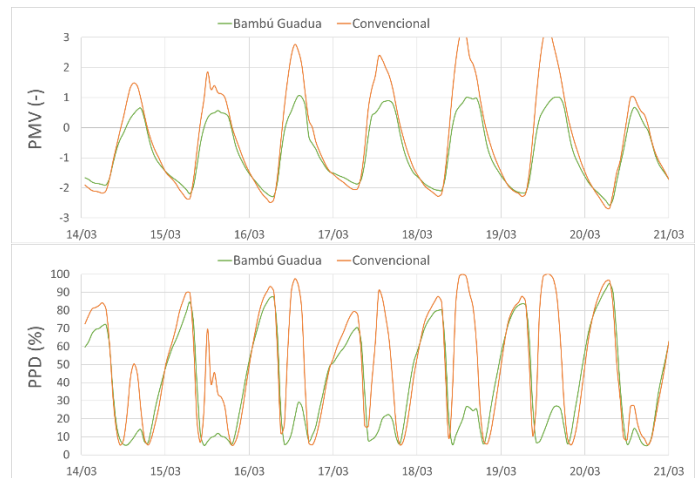


Figura 13. Simulación de los parámetros de confort térmico para las celdas estudiadas en el periodo comprendido entre el 14 y el 20 de marzo. Parámetro PMV (Imagen superior) y parámetro PPD (Imagen inferior)

A fin de determinar con mayor concreción estas variaciones entre máximos y mínimo, se ha realizado la evaluación del PMV y PPD, al igual que en el apartado anterior, en función de sus horas, los



días 21 de enero (figura 14) y 16 de julio (figura 15) para ambos bloques.

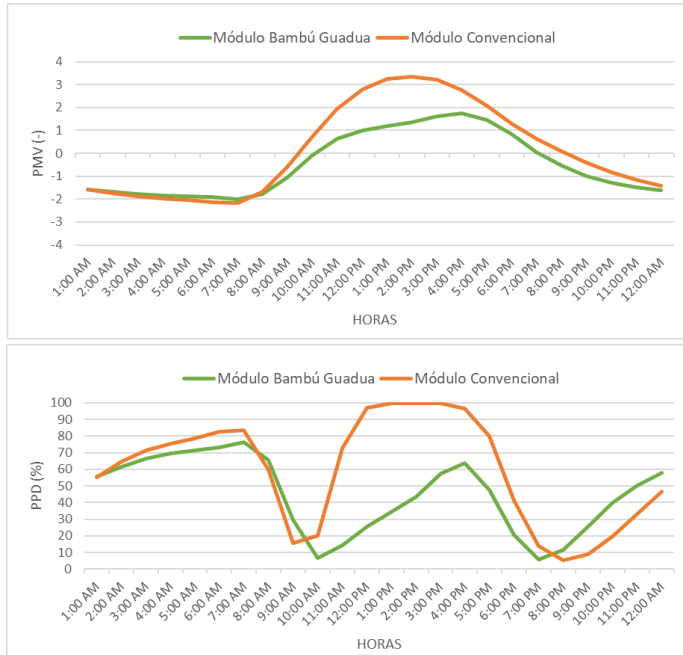


Figura 14. Simulación del PMV (imagen superior) y del PPD (imagen inferior) durante el día 21 de enero para ambos modelos

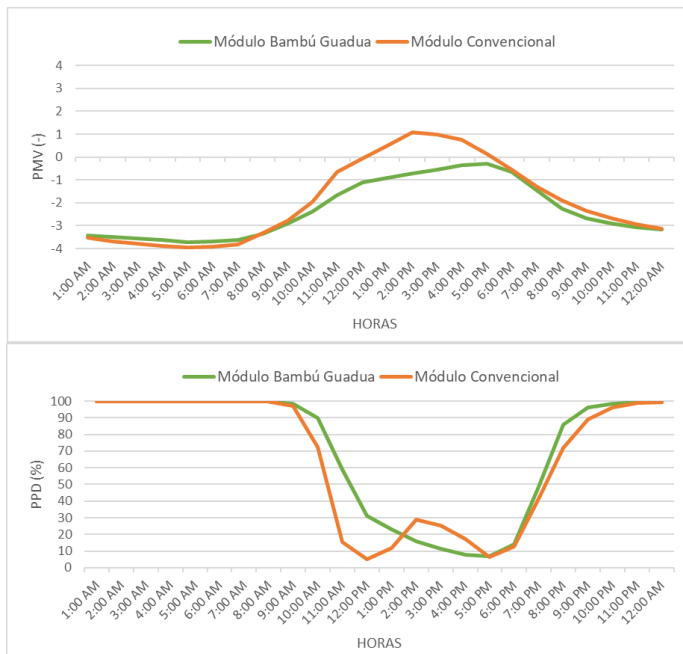


Figura 15. Simulación del PMV (imagen superior) y del PPD (imagen inferior) durante el día 16 de julio para ambos modelos

Para el día 21 de enero se determinan los mejores resultados de confort térmico entre las 9 y las 12 h y entre las 18 y las 21 h para la celda de Guadua, en donde los valores del PMV se encuentran cercanos a 0 (sensación térmica de neutralidad) y los del PPD se aproximan a la situación perfecta de satisfacción térmica, de en torno al 5 y 10 % (cabe recordar que no existe esa situación ideal del 0%), obteniéndose valores estables durante el resto del día, con valores mínimos de -2 durante las horas de noche, y máximos de 1,7 en las horas de más calor. Sin embargo, la celda convencional muestra que el confort térmico se logra en ventanas de tiempo más cortas, debido a su mayor variabilidad, siendo los períodos de entre las 9 y las 10 h y entre las 19 y las 22 h los de sensación térmica más confortable. Durante la noche se alcanzan valores extremos ligeramente superiores a -2, y durante las horas de día los valores logran alcanzar los 3,5. Según estos resultados, el rango de confort en el día en cuestión evaluado es mayor para la celda de Guadua y se presenta de forma más puntual en la celda convencional.

También se evidencia que en el caso de la Guadua los valores de sensación térmica suelen tener oscilaciones desde la situación de algo de calor a la situación de bastante frío. En cambio, en el modelo convencional la sensación térmica es ampliamente variable durante el día, desde mucho calor a bastante frío, siguiendo una especie de onda sinusoidal. Esto es una desventaja para días calurosos que son frecuentes en países tropicales como Colombia.

En la segunda situación simulada, la curva que representa el comportamiento de la Guadua con respecto al parámetro PMV sigue una trayectoria idéntica con respecto al primer caso, con una ventana de mayor comodidad térmica entre las 14 y las 18 h. El máximo no alcanza en ningún momento la sensación neutra mientras el mínimo se establece en -3,5 durante las horas de noche. En este caso, la tendencia va de mucho frío a la situación neutra.

Proporcionalmente, se obtienen las mismas diferencias en ambas curvas: en el bloque convencional se consigue una mejor satisfacción entre las 11 y las 13 h, y entre las 17 y las 18 h. Las oscilaciones de la curva muestran resultados



que exceden la situación de mucho frío, llegando a algo de calor.

Como análisis extra, hay que tener en cuenta que estos bloques están libres de cargas energéticas, por lo tanto, para asegurar el confort térmico sería necesario adicionar energías de calefacción y refrigeración.

En el caso de la Guadua, debido a su capacidad calorífica, se requerirá menor cantidad de energía, y según los resultados reportados del confort térmico la refrigeración no será necesaria, en contraste con la vivienda convencional, donde para aumentar el grado de satisfacción serán necesarias cargas tanto de calefacción como de refrigeración.

Los resultados obtenidos en la simulación permiten determinar el día en el cual se produciría la mayor carga de climatización. Específicamente para la Guadua, se observa que la mayor carga de calefacción se produce durante los meses de junio a septiembre, con requerimientos máximos en el mes de julio.

La satisfacción con el ambiente térmico es un proceso complejo que depende de la interacción de muchas variables, y esto debe tomarse en cuenta para el lugar de estudio [5], puesto que algunas regiones de Colombia tienen menor altura y temperaturas más calurosas, siendo más favorable el comportamiento térmico de este material.

4. CONCLUSIONES

La Guadua resulta un excelente sustituto en Colombia de los materiales convencionales, debido a sus propiedades térmicas, su abundancia y a las condiciones climáticas de este país.

El modelo dinámico generado en este trabajo ha permitido evaluar el comportamiento térmico de ambas celdas, resultando valores favorables para la Guadua en climas con variaciones significativas durante el día y la noche.

Para alcanzar un confort térmico más ajustado a la realidad sería necesario considerar las cargas de calefacción dentro de las viviendas. Sin embargo,

para el caso de la Guadua, debido a su mejor comportamiento térmico, se requerirá menor cantidad de energía, lo cual permitirá mayor beneficio económico y cuidado con el medio ambiente.

Por otro lado, las evaluaciones realizadas permiten establecer o priorizar posibles intervenciones de mejora y acondicionamiento energético.

Este trabajo servirá de soporte para impulsar el desarrollo de viviendas más sostenibles en Colombia proponiendo el uso de este material como una alternativa real en el sector de la construcción.

5. NOMENCLATURA

M es la tasa metabólica, en vatios por metro cuadrado (W/m^2)

W es la potencia mecánica efectiva, en vatios por metro cuadrado (W/m^2)

I_{cl} es el aislamiento de la ropa, en metros cuadrados kelvin por vatio ($m^2 \cdot K/W$)

f_{cl} es el factor de superficie de la ropa;

t_a es la temperatura del aire, en grados Celsius ($^{\circ}C$)

t_r es la temperatura radiante media, en grados Celsius ($^{\circ}C$)

v_{ar} es la velocidad relativa del aire, en metros por segundo (m/s)

p_a es la presión parcial del vapor de agua, en pascales (Pa);

h_c es el coeficiente de transmisión del calor por convección, en vatios por metro cuadrado kelvin [$W/(m^2 \cdot K)$]

t_{cl} es la temperatura de la superficie de la ropa, en grados Celsius ($^{\circ}C$).

HR es el porcentaje % de Humedad Relativa.



6. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor Francisco Javier Fernández García la ayuda y atención mostrada durante todo este tiempo.

También, a Óscar Fabián Martínez, la persona encargada de la instalación experimental, por toda la información brindada, que ha hecho posible que el desarrollo de la investigación fuera lo más exacta posible.

7. REFERENCIAS

- [1] Bose, B. K. (2010). Global warming: Energy, environmental pollution, and the impact of power electronics. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 4(1), 6-17.
- [2] Matthews, T. K., Wilby, R. L., & Murphy, C. (2017). Communicating the deadly consequences of global warming for human heat stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(15), 3861-3866.
- [3] Álava Gregores, I. (2016). Estudio comparativo de diferentes modelos de simulación de la transferencia de calor en sistemas de calefacción por suelo radiante. (TFM). Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.
- [4] Suárez García, C. (2015). Estudio dinámico de los sistemas de ventilación con recuperación de calor y microgeneración con motor de combustión interna en una vivienda unifamiliar. (TFM). Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.
- [5] Martínez Sarmiento, E. A. J. (2017). Normativa española y estudio de alternativas de mejora de la eficiencia energética de un departamento modelo en la ciudad de Quito. (TFM). Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.
- [6] Lara Bueno, R. (2019) Análisis y Cálculo de los puentes térmicos en la arquitectura de tipologías asturiana en viviendas unifamiliares de bajo consumo de energía. (TFM). Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.
- [7] Delzendeh, E., Wu, S., Lee, A., & Zhou, Y. (2017). The impact of occupants' behaviours on building energy analysis: A research review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- [8] Cotorobai, V., Negară, I., Brata, S., & Leancă, L. (2017). Considerations of the Dynamic Comfort Indicators in Very Efficient Energetic Buildings. *Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. Sectia Constructii, Arhitectura*, 63(4), 29-43.
- [9] Garzón, E., García, M. C., Pérez-Villarejo, L., Martínez-Martínez, S., & Sánchez-Soto, P. J. (2017). Guadua angustifolia as a Structural Material for Greenhouse Design. In *Project Management and Engineering Research* (pp. 201-213). Springer, Cham.
- [10] Escamilla, E. Z., Archilla, H., Nuramo, D. A., & Trujillo, D. (2019). Bamboo: An engineered alternative for buildings in the global South. In *Bioclimatic Architecture in Warm Climates* (pp. 397-414). Springer, Cham.
- [11] Óscar González Yebra, 2014. Caracterización del bambú Guadua (Guadua Angustifolia) para el diseño e industrialización en España.
- [12] O. F. Martínez, C.R. Ardila, F.J. Fernández, 2018. Design of experimental determination of the thermal behavior of industrialized constructions with Guadua angustifolia kunth in Colombia. 9th European Congress on Energy Efficiency and Sustainability in Architecture and Urbanism (EESAP 9) and 2nd International Congress on Advanced Construction (CICA 2).
- [13] Benavides, A. S. J. (2012). Proposta de sistema construtivo para habitação de interesse social com bambu Guadua: um estudo de caso no Equador.
- [14] Gonzáles, H. Á., Hellwig, S., & Montoya, J. A. (2009). Resultados del ensayo del modulo de young y resistencia a la flexion de vigas laminadas de Guadua angustifolia kunth. *Scientia et Technica*, 3(40).



- [15] García, M. C., Botero, A. P., Quiroga, F. A. B., & Robles, E. A. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería*, (36), 60-64.
- [16] Budaiwi, I., Al-Homoud, M., & Abdou, A. (2009). Implementation of a multi-phase approach for investigating and remedying a thermal comfort problem in an office building. *Indoor and Built Environment*, 18(1), 52-65.
- [17] AENOR (2006). Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local. UNE-EN ISO 7730:2006. Madrid: AENOR, 2006.
- [18] Armendáriz, P. (2001). Evaluación del bienestar térmico en locales de trabajo cerrados mediante los índices térmicos PMV y PPD.
- [19] AENOR (2002). Ergonomía de los ambientes térmicos. Instrumentos de medida de las magnitudes físicas. UNE-EN ISO 7726:1998. Madrid: AENOR, 2002.
- [20] Base de datos de la Herramienta Unificada LIDER/CALENER (HULC) para verificación del Documento Básico HE del CTE y la Certificación Energética de Edificios.