

Evaluación del rendimiento energético de los cerramientos a base de bambú bajo el clima tropical de la Ciudad de Panamá

Energy performance evaluation of bamboo-based envelopes under the tropical climate of Panama City



González-Santos, Chrissmar; Delgado, Nicole; Madrid-Vásquez, Edinelsy; Guevara-Sinisterra, Patricia; Villarreal- Scott, Wilfredo; Chen Austin, Miguel

Chrissmar González-Santos

Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

Nicole Delgado

Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

Edinelsy Madrid-Vásquez

Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

Patricia Guevara-Sinisterra

Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

Wilfredo Villarreal- Scott

Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

Miguel Chen Austin

miguel.chen@utp.ac.pa

Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

Revista de I+D Tecnológico

Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

ISSN: 1680-8894

ISSN-e: 2219-6714

Periodicidad: Semestral

vol. 19, núm. 1, 2023

orlando.aguilar@utp.ac.pa

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/339/3394328007/>

Resumen: El crecimiento social y económico tiene una alta influencia en el incremento en la demanda energética, principalmente, la carga térmica de refrigeración. El bambú, como material ecológico, ha sido utilizado como elemento de construcción en tiempos antiguos, por ende, este estudio se realizó para evaluar el rendimiento energético de los cerramientos a base de bambú en una residencia bajo el clima tropical de la Ciudad de Panamá. Por medio de una revisión bibliográfica se obtuvieron las propiedades térmicas de tres configuraciones de bambú. Dichas datos fueron subidas al software DesignBuilder en donde se encontraba el modelo de la residencia. Se realizaron simulaciones bajo un análisis paramétrico evaluando las variables de entrada conformadas por 11 materiales de la envolvente formados por materiales de construcción convencionales y biocompuestos de bambú. Las variables de salida fueron las cargas térmicas a través de techo, paredes y cielo raso y las horas de no confort térmico a 80% de accesibilidad de la norma ASHRAE 55. Para el mes más caluroso (marzo), la carga térmica a través de paredes para las tres configuraciones de bambú fue de 48 KWh, resultando ser 3 veces menor que las cargas térmicas a través de las paredes con materiales convencionales. La carga térmica a través de techo y cielo raso fueron insignificantes ya que el diseño con materiales convencionales del techo favorece la pérdida de calor. Se alcanzaron condiciones de confort constantes anuales y la reducción de la carga térmica en la residencia.

Palabras clave: Bambú, biomimética, cerramiento, edificación, materiales compuestos, rendimiento energético.

Abstract: . Social and economic growth greatly influences the increase in energy demand, mainly the cooling thermal load. As an ecological material, bamboo has been used as a construction element in ancient times. Therefore, this study was conducted to evaluate the energy performance of bamboo-based enclosures in a residential building under the tropical climate of Panama City. Through a literature review, the thermal properties of three bamboo configurations were obtained. These data were uploaded to the DesignBuilder software, where the model of the residential building was located. Simulations were performed under a parametric analysis evaluating the input variables consisting of 11 envelope materials formed by conventional

building materials and bamboo biocomposites. The output variables were the thermal loads through the roof, walls, and ceiling and the hours of thermal non-comfort at 80% of ASHRAE 55 accessibility. For the hottest month (March), the thermal load through walls for the three bamboo configurations was 48 KWh, three times lower than the thermal loads through walls with conventional materials. The thermal loads through the roof and ceiling were negligible since the design with conventional roof materials favors heat loss. Constant annual comfort conditions and reduced heat loads in the residential building were achieved.

Keywords: Bamboo, biomimicry, envelope, building, composite materials, energy performance.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la temperatura media mundial y la falta de recursos para el entorno construido, están llevando a los investigadores a buscar materiales de construcción alternativos y enfoques de diseño basados en la naturaleza, que además permitan aumentar la eficiencia energética. Igualmente, dicha problemática ha llevado a enfatizar la importancia de evaluar los factores críticos que inciden en el consumo de energía de una edificación, como es el caso de las condiciones climáticas, durante el diseño y construcción de esta.

Los métodos de evaluación del rendimiento energético de una edificación posibilitan la adopción de medidas para una construcción sostenible, ya que prevén el ahorro de energía mediante la identificación de factores que pueden ser regulados.

En este proyecto se presenta la implementación de materiales compuestos de estructuras de bambú en la construcción de la envolvente de edificios diseñados y construidos bajo las condiciones de un clima tropical como lo es el de nuestro país, como estrategia biomimética que brinda una solución a la problemática que presentan las edificaciones construidas a base de materiales convencionales con respecto a su eficiencia energética. Es importante mencionar, que la biomimética puede definirse como el estudio del comportamiento y evolución de la naturaleza para la obtención de un diseño que puede aplicarse en la solución de problemas que presenta el ser humano [1]. El enfoque biomimético en el área del mejoramiento de edificaciones, se centra en el estudio de estrategias de la naturaleza que puedan aplicarse al diseño de la estructura de la edificación, así como el estudio de las propiedades de materiales que pueden incluirse en la envolvente.

Los materiales basados en el bambú han despertado un gran interés en el diseño y la construcción de edificios sostenibles debido a su rápido crecimiento, sus adecuadas propiedades térmicas y mecánicas, y su eficacia en la absorción de CO₂. El bambú se integra en diferentes formas para crear sistemas constructivos para las envolventes de los edificios, con el fin reducir el uso de los equipos de acondicionamiento al funcionar como aislante térmico.

Por ello, como primer punto, se busca recopilar y analizar la información disponible en la literatura relacionada a la evaluación del comportamiento térmico y energético de los sistemas constructivos basados en el

bambú. Como segundo punto, se realizará la comparación del rendimiento energético una edificación construida con los materiales convencionales que se utilizan en Panamá, con el rendimiento de esta al implementarse materiales compuestos de bambú, mediante simulación en el software DesignBuilder [2].

1.1 Estado del arte

1.1.1 Introducción a la biomimética

La biomimética de bios, que significa vida, y mimesis, que significa imitar, es una disciplina que estudia las mejores ideas de la naturaleza y luego imita estos diseños y procesos para resolver problemas humanos. Estudiar una hoja para inventar una mejor célula solar es un ejemplo, como "innovación inspirada en la naturaleza" [3]. La idea central es que la naturaleza, ya ha resuelto muchos de los problemas a los que se enfrenta ahora el ser humano.

En los tiempos modernos de hoy, donde la insostenibilidad amenaza la existencia misma de la humanidad, el renacimiento de la filosofía de la biomimética abre una vía a posibles soluciones. Es un horizonte emergente que mira al mundo natural en busca de ideas e inspiración para todo tipo de oportunidades de diseño.

No podemos considerar a la biomimética una nueva disciplina, ya que los primeros ejemplos se pueden ver en los bocetos de Leonardo Da Vinci de una máquina voladora inspirada en las alas de un murciélago [4]. Otro ejemplo proviene de Filippo Brunelleschi, quien estudió la resistencia de las cáscaras de huevo y diseñó una cúpula más delgada y liviana para la catedral de Florencia en 1436 [5]. En 1809, el arquitecto naval Sir George Cayley diseñó cascos de barcos más aerodinámicos mediante el estudio de delfines [6]. Un ejemplo más famoso ocurrió en 1948 cuando George De Mestral, un ingeniero suizo, sacó a su perro a cazar y salió de los arbustos cubierto de semillas. Después de examinar los diminutos ganchos de las fresas, descubrió un sistema de gancho utilizado por la planta para esparcir semillas. Inspirado en esto, De Mestral creó el velcro [7].

Para el diseño biomimético, existen dos enfoques principales: el enfoque basado en problemas y el enfoque basado en soluciones. El enfoque basado en problemas es un 'Diseño para la biología'. Se basa en la identificación de los objetivos y la limitación del diseño. El diseñador en este enfoque comienza con la identificación del

problema, luego busca soluciones a partir de organismos naturales. Los biólogos y diseñadores relacionan el problema con un organismo que ha resuelto un problema similar. Este enfoque también se puede llamar 'Desafío a la biología', ya que busca respuestas en biología para el problema humano. El diseñador mejora un diseño específico o resuelve un problema de diseño explorando y observando la naturaleza.

Por otro lado, el enfoque basado en soluciones es una "biología para el diseño" que se utiliza cuando el principio biológico es la fuente de las ideas de diseño [8]. El proceso de diseño depende originalmente del conocimiento científico de biólogos y científicos en lugar de los problemas de diseño humano. El diseñador identifica una característica útil de la naturaleza, que se abstrae y traslada a un contexto tecnológico antes de definir el objetivo del diseño [8].

Adicionalmente, hay tres niveles principales de biomímesis: organismo, comportamiento y ecosistema. A nivel de organismo, los edificios pueden imitar las características de un organismo individual. En el nivel de comportamiento, el diseño puede inspirarse en cómo se comporta el organismo o se relaciona con su contexto más amplio. A nivel de ecosistema, el diseño puede basarse en todo el ecosistema de un organismo y su entorno. Enfatizando el proceso natural y el ciclo del entorno mayor [8].

Sin embargo, es importante resaltar que en este proyecto nos enfocaremos en el nivel de organismo considerando el bambú como material para construcciones sostenibles, es decir, en el potencial que presenta la biomimética para las edificaciones.

1.1.2 Interés en el bambú

Desde la antigüedad, el bambú se ha utilizado en muchas áreas de la vida humana, desde utensilios domésticos hasta la construcción de casas y puentes, debido a su alta resistencia a los terremotos [9], así como a sus propiedades mecánicas distintivas, comparables al acero dulce, fundición hierro, aleaciones de aluminio y madera [10], [11].

En los últimos años, se ha empezado a exigir la promoción de construcciones sostenibles en el desarrollo y uso de materiales de construcción ecológicos [12], y como el bambú se considera ampliamente como un tipo típico de material ecológico, su uso como material de construcción verde se ha producido cada vez más a nivel

internacional [13]. Cada vez hay más aplicaciones exitosas de bambú en el sector de la construcción a nivel mundial, como el techo de bambú en el Aeropuerto Internacional de Madrid en España, los pisos de bambú en la Biblioteca Clinton en los Estados Unidos, el Departamento de Tokio Dong Wu en Japón y la sala de exposiciones de BMW. y la sede de IBM en Alemania [14].

Muchos gobiernos del mundo ya han introducido varias medidas políticas para promover la aplicación del bambú como material de construcción. En Europa, se han introducido varios programas para promover los materiales de bambú, por ejemplo, "Gestión sostenible y mejora de la calidad de bambúes y productos [15] y "Nuevo biomaterial de ingeniería de bambú para componentes de construcción sostenibles" [16] en países como el Reino Unido, Alemania, Bélgica e Italia. El gobierno de la India lanzó la "Misión nacional del bambú" en 2006 [17]. El gobierno chino ha estado promoviendo los materiales de bambú a través de la introducción de una serie de documentos de orientación [13], por ejemplo, el programa de "Reemplazo de la madera con bambú" publicado en 2005. Se incluyó el tema de cómo producir y utilizar el bambú como material de construcción. como un área de investigación clave en el 13º Plan Quinquenal de China [13].

A continuación, en la Tabla 1 presentamos diversos beneficios del bambú listados en la literatura.

TABLA 1.
Literatura enlistando beneficios de la aplicación del bambú para materiales de construcción ecológicos [8].

Ref.	Beneficios
[18]	• Secuestra altos niveles de CO₂ • Creación de empleo y mejora de ingresos niveles en zonas rurales y áreas urbanas
[19]	• Rápido crecimiento en materias primas • Rotación más corta • Mayor resistencia mecánica • Recurso abundante y sostenible
[20]	• Ventaja económica debido a la rotación más corta • Recurso abundante • Consumo de CO₂ y liberación de oxígeno • Menos uso de energía en proceso de producción • Flexible, ligero, excelente resistencia a la tracción • Bajo costo
	• Almacenamiento de carbono • Mitigar el efecto del cambio climático • Amigable con el medio ambiente • Crecimiento rápido
[21]	• Conservación de energía • Reducción de emisiones de CO₂ • Sustitución de combustible bioquímico • Edad de rotación corta • Alta resistencia a la tracción

1.1.3 Casos de estudio

En esta sección se evaluaron diversas edificaciones en las cuales se emplean estrategias utilizando el bambú. Cabe destacar que debido al diámetro límite y la baja rigidez, el bambú por su cuenta no se puede usar mucho en los edificios modernos. Es por esto por lo que materiales biocompuestos de bambú podrían resolver estos problemas [22].

Existen diversos tipos de productos industriales de bambú actualmente, como madera de bambú laminada (LBL), madera de hebras de bambú paralelas (bambú trazador), materiales compuestos de bobinado de bambú, materiales compuestos de plástico de bambú, materiales compuestos de tejido de bambú (bambú adhesivo), compuestos de partículas de bambú materiales, materiales compuestos de madera de bambú, etc. [22],[23].

La madera de bambú laminada (LBL) es uno de los principales productos en el mercado y se ha utilizado ampliamente en el área de la construcción [24]. En este caso se diseña una edificación para oficinas (Figura 1) a base de LBL, material el cual presenta una densidad de 0.622 g/cm^3 con la desviación estándar de 0.019 g/cm^3 [22].



FIGURA 1.
Ilustración de la edificación de LBL completada
[23]

Entre estas cabe destacar la casa de bambú del Parque de Bambú Negro de Beijing mostrada en la Figura 2.



FIGURA 2.
La casa de bambú del Parque de Bambú Negro de Beijing.
[25]

Basándose en CLT, un grupo de investigación dirigido por Xiao ha diseñado un nuevo material compuesto de glubam [26] (bambú laminado encolado) y madera, llamado bambú y madera contralaminados (CLBT o CLTB), el cual se fabrica colocando glubam y capas de madera de forma adyacente en una dirección alternativa ortogonal y luego presionándolas juntas [25]. Un factor importante que destacar es que todos los componentes estructurales y conectores de las estructuras CLBT se pueden estandarizar. Por lo tanto, su velocidad de construcción y montaje es significativamente más rápida que las estructuras de hormigón y mampostería. Las casas de estructura CLBT y estructura de madera generalmente se pueden completar en

aproximadamente dos meses, mientras que las casas de estructura de hormigón armado de la misma escala necesitan aproximadamente 10 meses [25]. Para el caso de la casa de bambú presentada, la construcción del sistema principal, la decoración interior y exterior fue completada en el lugar por siete trabajadores en solo tres semanas. El área total de construcción es de 120 metros cuadrados. La casa de bambú está diseñada para resistencia al fuego de nivel dos, intensidad de fortificación sísmica severa, impermeabilización secundaria del techo y posee una vida útil de diseño de 50 años.

Desde el punto de vista de la protección del medio ambiente, el impacto de la estructura CLBT es mínimo en comparación con los cementos, hormigones y otros materiales de construcción tradicionales. En resumen, se ahorra un 20% en costos de materiales y un 60% en el consumo de agua [25].

Adicionalmente, en el uso doméstico, la nueva capa de aislamiento implementada en la casa CLBT tiene un buen rendimiento y, por lo tanto, puede reducir el consumo de energía para mantener la temperatura interior, así como el costo de la energía.

Factores como desastres naturales ponen a prueba las construcciones y obligan a la optimización de estructuras y materiales de construcción para evitar futuras tragedias. Es por esto por lo que cuando un terremoto que azotó Lombok, Indonesia, en 2018 destruyó más de 32 000 casas de ladrillo [27], las cuales se derrumbaron debido a que fueron construidas informalmente sin calcular la fuerza estructural y la sabiduría local disponible en el área, se debe analizar la situación y plantear alternativas. En esta ocasión, el número de víctimas que murieron fue causado mayormente por los escombros de sus propias casas, no directamente por el terremoto [28].

Con base en este fenómeno, [27] presenta un proyecto exploratorio para desarrollar un concepto de casas resistentes a desastres de bajo costo, utilizando la sabiduría local, y al mismo tiempo ser capaz de acomodar de manera flexible las necesidades de los residentes siguiendo el crecimiento de los habitantes de la casa.

Este estudio propone un diseño de casa incremental resistente a desastres a partir de material de bambú que se puede desarrollar de acuerdo con las necesidades de los residentes y adaptarse a las actividades económicas de los residentes que se acaban de recuperar de los desastres naturales.

Aparte de su abundante población, el bambú tiene la ventaja de soportar cargas de acero, compuestos de aluminio u hormigón de manera eficiente (a juzgar por la relación fuerza-peso) [28]. Además, el bambú también posee ventajas en términos de flexibilidad y absorción de energía. Por lo tanto, es un material ideal para su uso en estructuras resistentes a terremotos [29].

Esto hace que el bambú sea un material versátil y se puede transformar fácilmente en casi todas las características de un edificio residencial.

En la Figura 3 se ve el diseño conceptual creado por

[27] para proponer edificaciones resistentes y sostenibles a base de bambú.



FIGURA 3.

Visualización del diseño conceptual de la casa a base de bambú propuesta.
[27].

En otro estudio, el bambú se está utilizando en las paredes y elementos compuestos para vigas y columnas [29] que constituyen el principal sistema de soporte de carga estructural para edificios. El bambú también se puede utilizar como material para techos debido a sus propiedades como resistencia, durabilidad y ligereza. Además, los beneficios del bambú como material de construcción son diversos y pueden conducir a mejoras en el desempeño estructural con respecto a la resistencia al fuego, la seguridad y la elasticidad [30].

Este proyecto tiene como objetivo crear una forma económicamente modesta de abstracción de tierras forestales. Adicionalmente, la edificación plantea la posibilidad de cubrir menos superficie de terreno forestal y su techo se eleva en forma de una curva ascendente. La forma del techo se desarrolla a partir de la forma de un perfil topográfico/característica de una colina [31]. Aquí, se destaca la viabilidad de introducir el bambú como material sostenible para minimizar los impactos financieros y ambientales atribuidos al cambio climático y las emisiones de carbono, desde la planificación inicial hasta la construcción final (Figura 4).



FIGURA 4.

Ilustración del espacio y los principios bioclimáticos del diseño propuesto.
[32]

Dicho proyecto está diseñado con los principios del diseño bioclimático, utilizando sistemas de calefacción solar activos y pasivos y enfriamiento natural, como se puede apreciar en la figura 4.

En resumen, la casa actual incluye la instalación de aberturas y áreas vidriadas en la casa orientadas hacia el este y el oeste, ventilación vertical a través de los espacios abiertos, ventilación cruzada a través de las rejillas de ventilación del techo y minimización de pérdidas de energía a través de paredes de bambú aisladas. El propósito de la parte inferior del techo vidriado es permitir la entrada de luz natural al espacio y expulsar el aire caliente del interior. Se han utilizado sistemas activos como paneles solares fotovoltaicos, combinados con el uso de bomba de calor y fancoil [32]. En base a los estudios anteriormente mencionados, queda en evidencia que la aplicación de bambú laminado para edificios de madera brinda muy buenos resultados y por ello, ha atraído la atención de muchos ingenieros en el campo industrial. Con tantas ventajas como el respeto

al medio ambiente, el rápido crecimiento, la alta relación resistencia-peso, la sostenibilidad y la capacidad de ser reutilizadas o recicladas, las estructuras de madera de bambú laminada deberían tener un futuro brillante.

Debería ser una forma de estructura principal para los futuros edificios.

Así, el presente trabajo busca evaluar el rendimiento energético de los cerramientos a base de bambú en edificios, para un clima tropical como el de la Ciudad de Panamá. Esto se realiza a través de las siguientes fases:

- Definición de los problemas de los cerramientos de edificaciones no sostenibles actuales, mediante análisis bibliométrico.
 - Recopilación y análisis de la información relacionada con los métodos empleados a lo largo de los años.
 - Presentación de un caso de estudio que evalúe diferentes envolventes a base de bambú encontradas en la literatura a través de simulaciones dinámicas en DesignBuilder, pero bajo el clima tropical de la ciudad de Panamá.
 - Comparación del rendimiento térmico y energético de los sistemas constructivos basados en el bambú como parte de la envolvente de los edificios en condiciones de calor y humedad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Las simulaciones para la evaluación del rendimiento de cerramientos construidos a base de bambú se realizaron

en el software DesignBuilder, que es una herramienta de simulación dinámica para la evaluación del comportamiento energético de edificaciones.

Para llevar a cabo la simulación, primero fue necesario realizar la determinación de la data a ingresar en el software. Por ello, a continuación, se dedica una sección para detallar el proceso y otra, para describir cómo se realizó la simulación del caso de estudio.

2.1 Determinación de la data para la simulación

Los cuatro aspectos más importantes que considerar antes de realizar la simulación eran: selección de la ubicación de la edificación, determinación del tipo de edificación a evaluar, selección de las temporadas climáticas críticas y determinación de las propiedades de los materiales de construcción a base de bambú que serían evaluados.

Primero, se determinó que la simulación se desarrollaría en una residencia, ubicada en los terrenos de la Universidad Tecnológica de Panamá. Por lo que se utilizó la data meteorológica disponible para el Aeropuerto Internacional de Tocumen, que proporciona DesignBuilder. La residencia con sus respectivas medidas y especificaciones fue construida en el software, utilizando las herramientas geométricas del mismo.

Luego, con base en las previsiones climáticas y el régimen pluviométrico de Panamá de la Empresa de Transmisión Eléctrica, S.A. (ETESA) [33], en conjunto con los datos registrados por el Instituto Meteorológico Hidrológico de Panamá en la estación de Tocumen (Tabla 2), se decidió realizar simulaciones para los meses de marzo y octubre. Se seleccionó marzo, dado que, fue el mes más caluroso del presente año, y en años anteriores ha estado dentro de los más calurosos junto a abril y mayo. Mientras que octubre ha sido el mes con mayor precipitación.

TABLA 2.
Temperaturas máximas promedio de 2022 [34].

Mes	Temperatura máxima promedio (°C)
Enero	31.7
Febrero	32.6
Marzo	32.6
Abril	31.5
Mayo	30
Junio	28.8
Julio	30
Agosto	29.7
Septiembre	29.1
Octubre	28.9
Noviembre	28.8
Diciembre	31.6

Por último, las propiedades de los materiales convencionales que se evaluarán para la envolvente están disponibles en la librería del software. Y las propiedades de los materiales compuestos por bambú, se obtuvieron de un artículo encontrado en la literatura [35].

2.2 Simulación del caso de estudio

El caso de estudio escogido fue una residencia, que como se mencionó anteriormente se simulará situada dentro del terreno de la UTP. Esta cuenta con el área de sala-comedor-cocina, dos recámaras, un baño, cuarto eléctrico (ER) y sala de control (CR) (Figura 5).

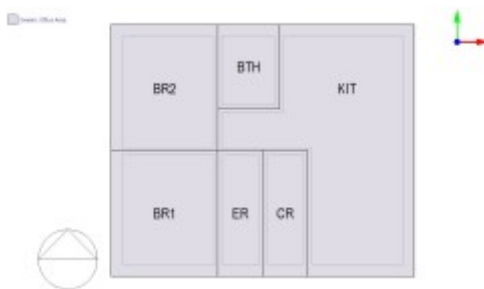


FIGURA 5.
Vista de planta de las particiones de la edificación simulada.
propia.

Adicionalmente, se presenta la carta solar, la cual es una representación gráfica, que nos permite obtener la posición del Sol en el cielo con respecto a la ubicación de la casa, considerando una latitud específica (Figura 6).

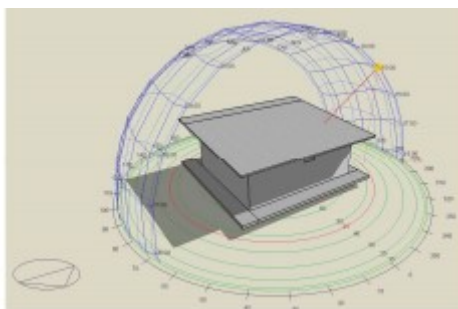


FIGURA 6.
Vista de la carta solar para la ubicación de la edificación simulada.
propia.

Para la simulación, se empleó un análisis paramétrico, que permite realizar la evaluación del impacto de distintos parámetros especificados, de manera secuencial

[36]. El parámetro de diseño evaluado en este caso es el material de la envolvente de la edificación, es decir, el material de las paredes y el techo. Es importante aclarar que el software permite modificar muchas otras variables de diseño como tamaño de las ventanas, orientación de la edificación, etc., pero nuestro interés se centra únicamente en cómo influyen los materiales de construcción empleados en los cerramientos.

En lo que respecta al análisis paramétrico, es necesario especificar las entradas y salidas, ya que nos interesa conocer el comportamiento de las variables de salida al modificar las de entrada [37]. Estas variables se comentan a continuación.

La simulación de la edificación, al cambiarle los materiales de construcción de los cerramientos (paredes externas, no particiones), hace la función de entrada para el análisis paramétrico. Y las salidas escogidas fueron: las horas de no confort térmico, utilizando la categoría de 80% accesibilidad de la norma ASHRAE 55 [38]; así como las ganancias de calor de las paredes, techo y cielo raso, teniendo en cuenta que en Panamá las edificaciones se construyen con un espacio de aire.

En cuanto a los materiales de las paredes, primeramente, se evalúan los materiales de construcción convencionales originales ("project wall") y luego, los biocompuestos de bambú, teniéndose un total de 11 opciones a evaluar. Y en cuanto al techo, que es un techo inclinado, se evalúan 9 opciones, siendo las convencionales zinc y teja, que son los más utilizados en nuestro país.

El software calcula un total de 99 combinaciones posibles, ya que se tienen 11 materiales distintos para pared y nueve para el techo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados de la simulación

Primero se realizó la simulación para el mes más caluroso escogido, que fue marzo, obteniéndose temperaturas de los cerramientos entre los 30 y 31.25 °C (Figura 7).

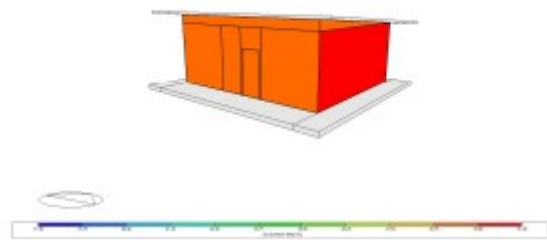


FIGURA 7.
Temperatura de las paredes para el mes de marzo.
propia.

Además, se obtuvieron gráficos con las ganancias de calor a través de las paredes (Figura 8), techo (Figura 9), cielo raso (Figura 10), así como de las horas de no confort térmico (Figura 11).

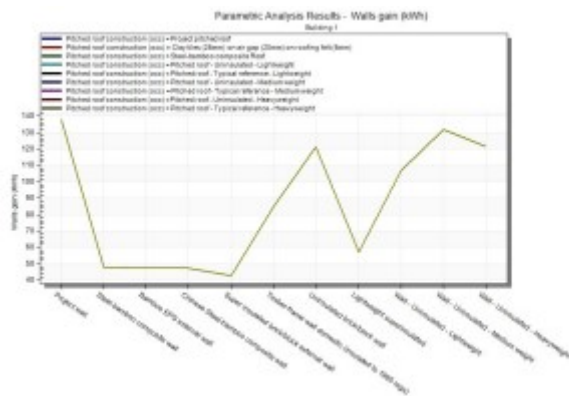


FIGURA 8.
Ganancia de calor en paredes durante marzo.
propia.

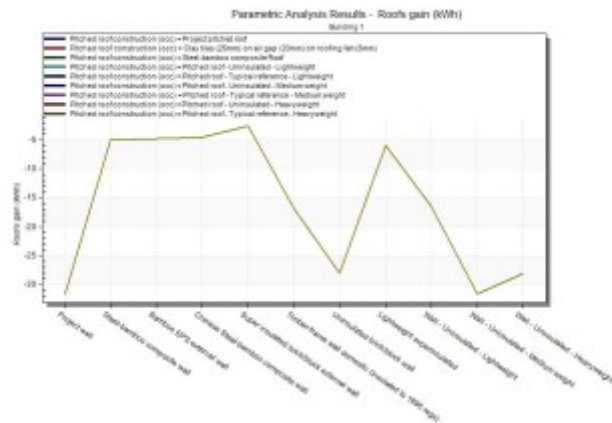


FIGURA 9.
Ganancia de calor en el techo durante marzo.
propia.

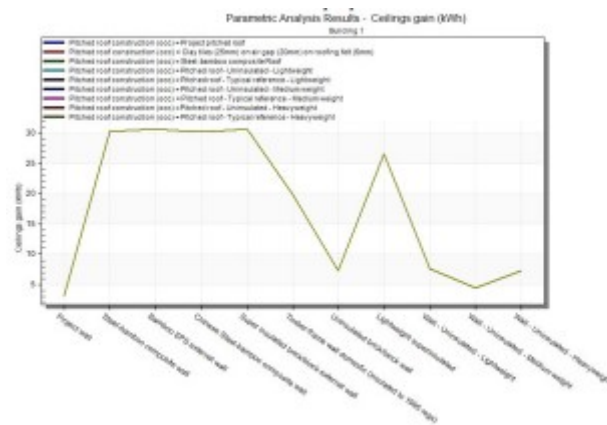


FIGURA 10.
Ganancia de calor en cielo raso durante marzo.
propia.

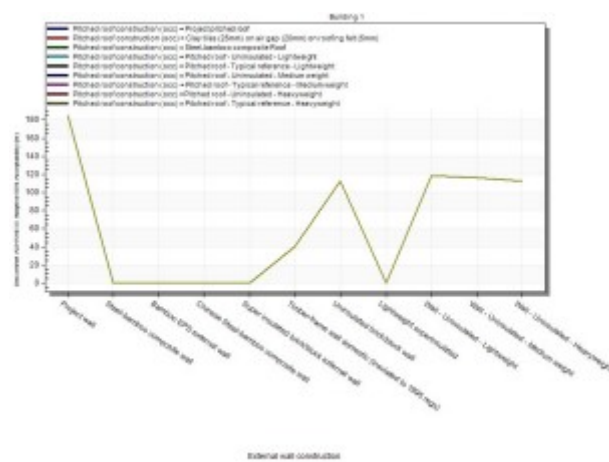


FIGURA 11.
Horas de no confort térmico durante marzo.
propia.

Luego, se realizó el mismo proceso para el mes de octubre. Y a continuación se presentan los resultados en el mismo orden que para el mes de marzo (Figuras 12- 15).

[illegible]

Parametric Analysis Results - Ceilings gain (KWh)

Building 1

Ceiling gain (KWh)

Legend:

- Pitched roof construction (100%) - Pitched roof
- Pitched roof construction (100%) - Clay tiles (20mm) - emerging (30mm) - emerging (30mm)
- Pitched roof construction (100%) - Stone lintels - composite roof
- Pitched roof construction (100%) - Pitched roof - Uninsulated - Lightweight
- Pitched roof construction (100%) - Pitched roof - Typical reference - Lightweight
- Pitched roof construction (100%) - Pitched roof - Uninsulated - Medium-weight
- Pitched roof construction (100%) - Pitched roof - Typical reference - Medium-weight
- Pitched roof construction (100%) - Pitched roof - Heavyweight
- Pitched roof construction (100%) - Pitched roof - Typical reference - Heavyweight

Scenarios (X-axis):

- Pitched roof
- Pitched roof construction (100%) - Pitched roof
- Pitched roof construction (100%) - Clay tiles (20mm) - emerging (30mm) - emerging (30mm)
- Pitched roof construction (100%) - Stone lintels - composite roof
- Pitched roof construction (100%) - Pitched roof - Uninsulated - Lightweight
- Pitched roof construction (100%) - Pitched roof - Typical reference - Lightweight
- Pitched roof construction (100%) - Pitched roof - Uninsulated - Medium-weight
- Pitched roof construction (100%) - Pitched roof - Typical reference - Medium-weight
- Pitched roof construction (100%) - Pitched roof - Heavyweight
- Pitched roof construction (100%) - Pitched roof - Typical reference - Heavyweight

PDF generado a partir de XML-JATS4R 

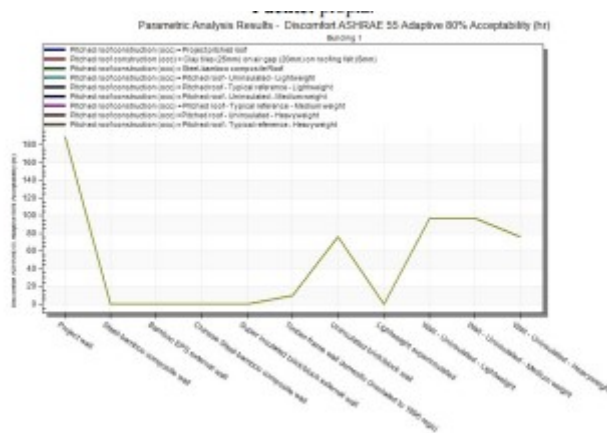


FIGURA 15.
Horas de no confort térmico durante octubre.
propia.

También pudo obtenerse un análisis general de la ganancia térmica de la residencia, donde se aprecia en un gráfico de barras (Figura 16), que aquellos elementos por encima del origen son los que aportan calor a la edificación, mientras que los que se encuentran en la parte negativa del eje, ayudan con el enfriamiento.



FIGURA 16.
Análisis de la ganancia térmica en cada aspecto del edificio.
propia

En base con los resultados de las diversas gráficas, tanto de horas de no confort térmico y ganancia de calor en las paredes para ambos meses críticos. La figura 17 muestra los componentes empleados para aplicar el bambú chino. Esta mezcla de componentes resultó ser la de mejor rendimiento en la edificación.

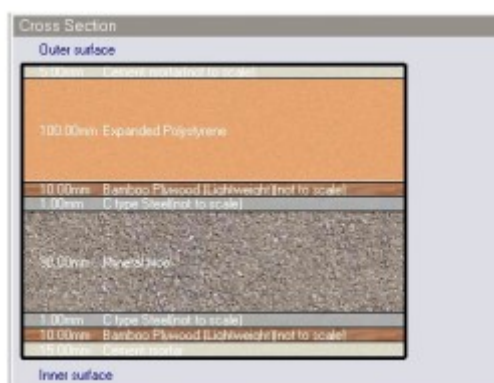


FIGURA 17.

Vista de los componentes del caso de estudio de bambú chino para la construcción de las paredes exteriores.
propia

3.2 Discusión

Para el mes más caluroso en Panamá, marzo, se obtuvo una ganancia de calor de 139 kWh para los muros de concreto. Sin embargo, para las tres configuraciones de bambú en la envolvente de la pared la transferencia de calor fue de 49-48 kWh; lo que nos indicó que las propiedades térmicas del bambú minimizan las ganancias de calor a través de las paredes.

Para los techos hechos con materiales a base de bambú, se observó una ganancia mínima de calor positiva (4 kWh); en cambio, el techo hecho con materiales de construcción convencionales contribuye al enfriamiento del aire interior. Pese a esta condición, la ganancia de calor a través del techo de bambú se considera poco significativa, pues es menor a los 5 kWh.

En el caso del cielo raso (37 kWh), este permite el paso del calor hacia el interior; pero, este aporte no es significativo.

La figura 15, muestra el análisis que se determinó para las horas de no confort en la edificación, estableciendo que para el mes de marzo no se obtuvieron dichas horas lo que se traduce en que, para el interior del recinto las condiciones de confort se mantienen favorables durante el mes.

Para el mes de octubre, la ganancia de calor en paredes fue de 119 kWh para materiales convencionales; y para las hechas a base de bambú 45-47 kWh.

En los techos a base de bambú el bambú tiene una ganancia de calor de -5 kWh, lo que demostró que se libera calor de la edificación, enfriando el recinto.

El cielo raso, con una ganancia de calor de 31 kWh, constituyó a un aporte mínimo.

De forma similar, las horas de no confort en el mes de octubre fueron nulas, lo que coincide con el mes más caluroso.

4. CONCLUSIONES

Las propiedades térmicas del bambú, según el análisis de los resultados de simulación y análisis paramétrico, contribuyen de forma positiva a la reducción de la carga térmica del interior de la edificación con respecto a los materiales de construcción convencionales.

El análisis de simulación dinámica nos indicó, según las condiciones descritas y las diversas configuraciones de envolventes que, los cerramientos óptimos para Panamá están conformados por el material de

construcción “Bambú Chino”, cuya configuración se expresó de la siguiente manera (desde la capa más externa hacia la más interna): mortero de cemento, poliestireno expandido, lámina de bambú, acero tipo C, lana mineral, acero tipo C, lámina de bambú y mortero de cemento.

Respecto a las ganancias de calor, el uso de materiales a base de bambú para los meses más críticos del año en las dos estaciones, mantienen en confort las condiciones interiores del recinto, lo que se traduce en un comportamiento de mayor frescura para la edificación, considerando el clima tropical de Panamá. Esto nos permite mencionar que, los cerramientos a base de bambú tienen potencial para ser una opción favorable para su aplicación en nuestro país.

La implementación de este tipo de envoltentes de carácter biomimético permite la disminución en el uso de sistemas de ventilación y acondicionamiento de aire, lo que favorece a la reducción de la demanda energética y, por consiguiente, da paso a que la carga de energía que se debe satisfacer pueda ser suplida por fuentes de generación de energías renovables que garanticen la sustentabilidad de la producción energética.

Tras la realización de esta investigación, una recomendación que debe tenerse en cuenta es que para aplicaciones de construcción no todas las especies de bambú son favorables, por lo que debe realizarse una minuciosa revisión de las propiedades térmicas y mecánicas de estas.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

Introducción, figuras y redacción de la mayor parte del manuscrito por C.G., N.D., E.M., P.G., y W.V. Concepto original, análisis formal y edición por C.G.,

N.D. y M.C.A. Metodología por C.G., N.D. y M.C.A. Análisis de resultados Supervisión y financiación por M.C.A.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Panamá por su colaboración. Parte de esta publicación ha recibido financiación de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) bajo el código de proyecto FID18-056, y del Sistema Nacional de Investigación (SNI).

REFERENCIAS

- [1] S. Mirniazmandan and E. Rahimianzarif, “Biomimicry, An Approach Toward Sustainability of High-Rise Buildings,” *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction A: Science*, vol. 42, no. 4, pp. 1837–1846, 2018, doi: 10.1007/s40995-017-0397-4.
- [2] DesignBuilder, “DesignBuilder Software Ltd - Home.” <https://designbuilder.co.uk/> (accessed Jan. 30, 2023).
- [3] U. Schwarzkopf, “Biomimética: imitar para evolucionar,” 2021. <https://blog.uribeschwarzkopf.com/biomimetic-a-imitar-para-evolucionar> (accessed Oct. 14, 2022).
- [4] O. A. Oguntona and C. O. Aigbavboa, “Biomimicry principles as evaluation criteria of sustainability in the construction industry,” *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 2491–2497, 2017, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2017.12.188.

- [5] E. Deniz Haberal and Ş. Taşlı Pektaş, "Comparing Biomimicry and Living Materials Approaches in Computational Design," 2021, pp. 28–34.
- [6] Z. Z. Dančuo, I. A. Kostić, O. P. Kostić, A. Č. Bengin, and G. S. Vorotović, "INITIAL DEVELOPMENT OF THE HYBRID SEMIELLIPTICAL-DOLPHIN AIRFOIL," vol. 26, no. 3A, pp. 2199–2210, doi: 10.2298/TSCI210515234D.
- [7] M. Nkandu and H. Alibaba, "Biomimicry as an Alternative Approach to Sustainability," *Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, CONSTRUCTIONS. ARCHITECTURE Section*, vol. 8, no. March, 2018, doi: 10.5923/j.arch.20180801.01.
- [8] N. Amer, "Biomimetic Approach in Architectural Education: Case study of 'Biomimicry in Architecture' Course," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 499–506, 2019, doi: 10.1016/j.asej.2018.11.005.
- [9] G. Yang and K. Wang, "Evaluation on the Application of GLB Structures," *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, vol. 08, no. 05, pp. 21–37, 2020, doi: 10.4236/msce.2020.85003.
- [10] H. Dauletbek, Assima; Li, Z. Xiong, and R. Lorenzo, "A review of mechanical behavior of structural laminated bamboo lumber," *Sustainable Structures*, vol. 1, no. 1, pp. 1–19, 2021, doi: 10.54113/j.sust.2021.000004.
- [11] Z. Li *et al.*, "A Strong, Tough, and Scalable Structural Material from Fast-Growing Bamboo," *Advanced Materials*, vol. 32, no. 10, pp. 1–8, 2020, doi: 10.1002/adma.201906308.
- [12] S. Shanmugam, C. Sun, Z. Chen, and Y. R. Wu, "Enhanced bioconversion of hemicellulosic biomass by microbial consortium for biobutanol production with bioaugmentation strategy," *Bioresource Technology*, vol. 279, no. December 2018, pp. 149–155, 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2019.01.121.
- [13] L. Shen, J. Yang, R. Zhang, C. Shao, and X. Song, "The benefits and barriers for promoting bamboo as a green building material in China- An integrative analysis," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 9, 2019, doi: 10.3390/su11092493.
- [14] S. Monge, "Bamboo ceiling in Madrid International Airport - MOSO® Bamboo specialist," *MOSO*, 2022. https://www.moso-bamboo.com/bamboo-inspiration/madrid-international-airport/?lang_selected=true (accessed Oct. 19, 2022).
- [15] European Commision, "Sustainable Management and Quality Improvement of Bamboos and Products | Project | Fact Sheet | FP4 | CORDIS | European Commission," 2002. <https://cordis.europa.eu/project/id/IC18970176> (accessed Oct. 19, 2022).
- [16] European Commission, "New BAMboo ENgineered bio- material for sustainable building components | BAMBENG Project | Fact Sheet | H2020 | CORDIS | European Commission," 2015. <https://cordis.europa.eu/project/id/663477> (accessed Oct. 19, 2022).
- [17] S. Lahiry, "India's National Bamboo Mission," *millenniumpost*, 2018. <http://www.millenniumpost.in/opinion/indias-national-bamboo-mission-308107> (accessed Oct. 19, 2022).
- [18] E. Z. Escamilla, G. Habert, J. F. C. Daza, H. F. Archilla, J. S. Echeverry Fernández, and D. Trujillo, "Industrial or traditional bamboo construction? Comparative life cycle assessment (LCA) of bamboo-based buildings," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 10, no. 9, 2018, doi: 10.3390/su10093096.
- [19] C. H. Fang *et al.*, "An overview on bamboo culm flattening," *Construction and Building Materials*, vol. 171, pp. 65–74, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.085.
- [20] V. Puri, P. Chakraborty, S. Anand, and S. Majumdar, "Bamboo reinforced prefabricated wall panels for low cost housing," *Journal of Building Engineering*, vol. 9, pp. 52–59, 2017, doi: 10.1016/j.jobbe.2016.11.010.
- [21] F. C. Chang, K. S. Chen, P. Y. Yang, and C. H. Ko, "Environmental benefit of utilizing bamboo material based on life cycle assessment," *Journal of Cleaner Production*, vol. 204, pp. 60–69, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.248.
- [22] L. min Tian, Y. feng Kou, and J. ping Hao, "Axial compressive behaviour of sprayed composite mortar–original bamboo composite columns," *Construction and Building Materials*, vol. 215, pp. 726–736, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.234.

- [23] J. Sua and and R. L. Haitao Lib, Zhenhua Xiong, "Structural design and construction of an office building with laminated bamboo lumber," *Sustainable Structures*, vol. 1, no. 2, pp. 1–8, 2021, doi: 10.54113/j.sust.2021.000010.
- [24] H. T. Li, R. Liu, R. Lorenzo, G. Wu, and L. Bin Wang, "Eccentric compression properties of laminated bamboo columns with different slenderness ratios," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, vol. 172, no. 5, pp. 315–326, 2019, doi: 10.1680/jstbu.18.00007.
- [25] Y. X. S. Dong, "Low-rise Cross Laminated Bamboo and Timber Building Design," *The World Congress on Advances in Civil, Environmental, & Materials Research*, pp. 25–28, 2020.
- [26] The Engineered Wood Association, "Cross-Laminated Timber (CLT) - APA," 2022. <https://www.apawood.org/cross-laminated-timber> (accessed Oct. 24, 2022).
- [27] Y. Kusuma, "Local wisdom as a sustainable building solution: Bamboo incremental house design concept," *Journal of Applied Science and Engineering (Taiwan)*, vol. 25, no. 1, pp. 119–127, 2022, doi: 10.6180/jase.202202_25(1).0012.
- [28] M. Mahdavi, P. L. Clouston, and S. R. Arwade, "Development of Laminated Bamboo Lumber: Review of Processing, Performance, and Economical Considerations," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 23, no. 7, pp. 1036–1042, 2011, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000253.
- [29] P. Jones, "The shaping of form and structure in informal settlements: A case study of order and rules in lebak siliwangi, Bandung, Indonesia," *Journal of Regional and City Planning*, vol. 30, no. 1, pp. 43–61, 2019, doi: 10.5614/jpwk.2019.30.1.4.
- [30] Z. Huang, Y. Sun, and F. Musso, "Hygrothermal performance optimization on bamboo building envelope in Hot-Humid climate region," *Construction and Building Materials*, vol. 202, pp. 223–245, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.039.
- [31] Z. Cui, M. Xu, Z. Chen, and J. Xiang, "Experimental study on thermal performance of bamboo scrimber at elevated temperatures," *Construction and Building Materials*, vol. 182, pp. 178–187, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.124.
- [32] S. Habibi, "Design concepts for the integration of bamboo in contemporary vernacular architecture," *Architectural Engineering and Design Management*, vol. 15, no. 6, pp. 475– 489, 2019, doi: 10.1080/17452007.2019.1656596.
- [33] S. A. E. Empresa de Transmisión Eléctrica, "RÉGIMEN PLUVIOMÉTRICO DE PANAMÁ - Hidrometeorología de ETESA." <https://www.hidromet.com.pa/es/regimen-pluviometrico-panama> (accessed Nov. 17, 2022).
- [34] "CLIMA Y CLIMATOLOGÍA - Instituto Meteorológico Hidrológico de Panamá." <https://www.hidromet.com.pa/es/clima-climatologia> (accessed Jan. 25, 2023).
- [35] L. S. Al-Rukaibawi, Z. Szalay, and G. Károlyi, "Numerical simulation of the effect of bamboo composite building envelope on summer overheating problem," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 28, no. September, 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.101516.
- [36] W. O'brien, A. Athienitis, P. Eng, and T. Kesik, "Parametric Analysis to Support the Integrated Design and Performance Modeling of Net-Zero Energy Houses," *ASHRAE Trans*, vol. 117, no. 2, 2011.
- [37] J. Araúz, D. Mora, and M. Chen Austin, "Assessment of Different Envelope Configurations via Optimization Analysis and Thermal Performance Indicators: A Case Study in a Tropical Climate," *Sustainability*, vol. 14, no. 4, p. 2013, Feb. 2022, doi: 10.3390/su14042013.
- [38] S. C. Turner et al., "ASHRAE Standard 55 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy," *International Journal of Refrigeration*, vol. 2, no. 1, pp. 56–57, 2010, doi: 10.1016/0140-7007(79)90114-2.