

Análisis de la influencia de la masa térmica en climas tropicales mediante simulación con Energy 2D

Miguel Chen Austin^{1,*} 

¹ Grupo de Investigación en Energética y Confort en Edificaciones Bioclimáticas (ECEB), Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Mecánica miguel.chen@utp.ac.pa
DOI: 10.33412/pri.v13.1.3262



Resumen: Existe una intrínseca relación entre la masa térmica y las propiedades del material de construcción, en relación a la capacidad que posee un material para almacenar calor. La importancia de la selección de tecnología adecuadas para edificaciones en clima tropical, junto con una alta masa térmica, radica en permitir una adecuada sensación de confort para los habitantes, manteniendo a la vez, un bajo consumo de energía. Así, este trabajo tiene como objetivo investigar sobre los efectos de la masa térmica en materiales comunes en edificios ubicados en países con climas tropicales, mediante la utilización del simulador Energy 2D. Estas simulaciones fueron realizadas con fines comparativos, para apreciar las diferencias y similitudes en el uso de determinados materiales de construcción en contraste con los mecanismos de transferencia de calor, como lo son conducción, convección y radiación, observando los efectos ocasionados por éstos. Según los resultados obtenidos, la madera resultó, en efecto, la mejor opción de material en la transferencia de calor por conducción, gracias a su baja conductividad, ya que en estos climas precisamente lo que se busca es conducir menos calor del exterior hacia el interior de las edificaciones. Sin embargo, en términos de radiación el hormigón reforzado es más favorable. En convección, el hormigón reforzado resultó también la mejor opción de material.

Palabras claves: edificaciones, envolvente, masa térmica, transferencia de calor, simulación.

Title: Analysis of the influence of thermal mass in tropical climates by simulation with Energy 2D

Abstract: There is an intrinsic relationship between thermal mass and the properties of the building material concerning the capacity to store heat. The importance of selecting the appropriate technology for buildings in a tropical climate, together with a high thermal mass, lies in propitiating adequate comfort sensation for the inhabitants while maintaining a low energy consumption. Thus, this work aims to investigate thermal mass effects on common materials in buildings located in countries with

tropical climates, using the Energy 2D simulator. These simulations were carried out for comparative purposes, to appreciate the differences and similarities in the use of certain construction materials in contrast to the heat transfer mechanisms, such as conduction, convection, and radiation, observing the effects caused by them. According to the results obtained, wood was, in fact, the best choice of material for heat transfer by conduction, thanks to its low conductivity, since in these climates, precisely what is sought is to conduct less heat from the exterior to the interior of the buildings. However, in terms of radiation, reinforced concrete is more favorable. In terms of convection, reinforced concrete was also the best choice of material.

Key words: buildings, building envelope, thermal mass, heat transfer, simulation.

Tipo de artículo: análisis.

Fecha de recepción: 29 de agosto de 2021.

Fecha de aceptación: 31 de enero de 2022.

1. Introducción

A través de los años el consumo total de energía eléctrica en edificios ha ido en aumento, debido a la demanda anual de calor en climas tropicales cuya temperatura media mensual es de 24 °C, requiriendo enfriamiento durante aproximadamente el 50% del año, lo que ha ocasionado una gran preocupación y ha obligado a la necesidad de emprender acciones para mejorar la eficiencia del uso de la energía.

Con el rápido crecimiento urbano se considera evidente que se requiere una reducción de la energía para calentar y enfriar las edificaciones, por ello se han incorporado medidas de eficiencia energética en las etapas de construcción o renovación de las edificaciones. Esta tendencia se está incorporando en los códigos y regulaciones de diseños en la mayoría de los países desarrollados; sin embargo, muchos códigos y diseñadores se centran principalmente o completamente en la resistencia térmica, excluyendo los efectos de la masa térmica [1].

La masa térmica de una edificación determina la capacidad que tiene para almacenar y absorber energía térmica, ya sea calor latente o sensible, y luego cuando las condiciones son propicias liberarla gradualmente. Esto a su vez puede tener efectos beneficiosos en las condiciones interiores durante los cambios de clima. En la estación lluviosa, "el calor almacenado durante la tarde puede ser liberado en la noche cuando las temperaturas exteriores son más bajas" esto lleva a reducir el uso del equipo de calefacción. En la estación seca, la masa térmica del edificio almacena calor, y al pasar las horas el calor almacenado empieza a liberarse tanto en el interior como el exterior, volviendo este fenómeno útil para evitar el sobrecalentamiento de la edificación a su vez evitar la sensación desagradable en los periodos más calientes [2].

Entre los factores importantes para crear confort térmico en el edificio tenemos: el movimiento del aire, la velocidad del aire, la temperatura y la humedad. El flujo de calor al edificio implica tres formas de transferencia de calor, conducción, convección y

radiación. Un aire ambiental atrae desde la chimenea hacia el techo y también fluye hacia las aberturas, ventanas y puertas de un edificio, esto provoca un movimiento de aire y beneficia la ventilación natural [3]. En los climas cálidos las edificaciones tradicionales con elevada masa térmica suelen tener efectos positivos reducidos, e incluso llegar a ser negativos. Esto se debe a que los interiores de los cerramientos tienden a mantener una temperatura cercana al promedio de las temperaturas exteriores, y dar como resultado una disconformidad a sus habitantes. Esta es una de las razones por las que, en los climas tropicales las edificaciones solían ser de materiales con una reducida masa térmica [4]. El envolvente del edificio, el sistema de enfriamiento y los electrodomésticos deben considerarse cuidadosamente en su diseño, particularmente en climas tropicales. El clima tiene un efecto importante en la selección de una tecnología adecuada para la construcción, como un sistema de refrigeración y electrodomésticos de alta eficiencia. Finalmente, el confort térmico debe lograrse con un bajo consumo de energía del edificio donde se basa la ventilación natural [5].

En los países de clima tropical, el consumo de energía en una construcción puede ser influenciado por distintos parámetros; como el diseño del edificio, la proporción de muro en blanco y las ventanas de vidrio que se encuentren ya que pueden hacer que se perciba una tasa muy alta de transferencia de calor con respecto al ambiente exterior y en comparación con una pared en blanco; por lo que se recomienda que el vidrio a utilizar en estos climas cuente con un valor bajo de transferencia térmica para disminuir el calor dentro del edificio y con un valor alto de transferencia de luz para que permita contar con más luz natural [6]. La ganancia de calor que se da a través de los edificios es ocasionada por diferentes factores, como la radiación solar durante el día en donde este calor es transferido a través de las paredes por conducción; la masa térmica de la pared, resistencia térmica, el coeficiente de emisión térmica, la absorción solar y el coeficiente de calor por convección también influyen en la transferencia de calor.

Uno de los países con este tipo de clima es Tailandia, en donde muchos de sus lugares cuentan con una ventilación natural no efectiva y con muy poca velocidad del viento [7], lo que implica que en la mayoría de los meses del año el interior de los edificios no cuente con una buena comodidad al tener que utilizar los sistemas de acondicionamiento de aire ocasionando un gran aumento de costos. Los veranos en este país tienen una alta cantidad de lluvia, mientras que los inviernos cuentan con menor cantidad; la temperatura promedio de la ciudad de Bangkok capital de Tailandia, es de aproximadamente 28.1 °C [8].

Indonesia también se encuentra en la lista de países con climas tropicales, en donde la temperatura exterior es de aproximadamente 26 °C y la máxima de 37 °C, su velocidad del viento varía entre 0.3 y 8.6 m/s. La carta bioclimática de Givoni-Milne es aplicada en este país ya que ofrece alternativas en cuanto al diseño de sus edificios para permitir el confort térmico, enfriamiento por evaporación, ventilación natural, masa térmica, aire acondicionado convencional, deshumidificación, calentamiento pasivo; esta herramienta también es utilizada para analizar diferentes tipos de clima del mundo [9].

En los últimos años, se ha incrementado la construcción de edificios en todo el mundo, pero en su mayoría han utilizado acristalamientos mal adaptados según sus condiciones climáticas ocasionando una alta penetración de la radiación solar. Muchos de estos edificios han tenido diferentes deficiencias, en cuanto a evaluaciones críticas de características, análisis detallado del diseño y la selección térmica con respecto a dispositivos de sombreado, envolvente, orientación, masa térmica, relación de acristalamiento, selección de materiales, entre otros.

En este artículo científico se implementa la siguiente estructura: Se comienza por una revisión bibliográfica sobre la interacción entre los elementos internos con respecto al ambiente exterior con base en datos publicados en revistas de investigación, la cual nos lleva a sentar el objetivo de esta investigación, se define la influencia de la masa térmica en los edificios, donde luego se realiza un análisis sobre la metodología a utilizar y en las dos últimas partes están evidenciados los resultados obtenidos y las conclusiones en base a los objetivos plasmados.

2. Estado del arte

Los estudios de la masa térmica en edificios y demás construcciones han permitido desarrollar fórmulas, tablas, gráficos; que han ayudado a estimar aproximaciones sobre las posibles condiciones térmicas de un lugar, tomando en cuenta los factores y parámetros ambientales que influyen de manera directa a los porcentajes de transferencia de calor. Entre estos podemos mencionar los realizados en los siguientes países:

ARGENTINA

Se definió una muestra de viviendas masivamente construidas mediante operativas oficiales en los principales centros urbanos del Nordeste Argentino (NEA) y se realizaron simulaciones de su desempeño y su consumo de energía anual para climatización electromecánica, mediante el software Energy Plus. En este estudio se definió una muestra de cinco tipologías o casos de viviendas de producción estatal ampliamente difundidas en los principales centros urbanos del NEA (Resistencia, Corrientes, Posadas y Formosa), representativas de las situaciones de diseño arquitectónico y urbano más habituales. En cuanto a su materialidad constructiva, dichas viviendas resultaron una situación intermedia respecto a la masa térmica de sus envolventes: techos livianos en general (chapas galvanizadas con entretechos y cielorrasos independientes), y muros exteriores más pesados (ladrillos cerámicos macizos comunes o ladrillos cerámicos huecos).

Bajo las condiciones locales de uso y gestión, las envolventes livianas arrojaron mejores resultados respecto a las másicas. Teniendo en cuenta las consideraciones expuestas respecto al modo "mixto" de uso y gestión de las viviendas (abiertas en determinados horarios; y cerradas y con acondicionamiento artificial en otros horarios), y respecto a las reducidas amplitudes térmicas estivales, así como respecto a lo obtenido mediante las simulaciones dinámicas, se propone una evaluación de la inercia térmica de las envolventes de las viviendas que tenga en cuenta, en síntesis, lo siguiente: Que el factor esencial a identificar es el

modo de uso y gestión predominante de la vivienda en cuanto a su apertura al exterior (según predomine su uso abierta sin climatización, o cerrada con climatización) y su utilización o no de climatización electromecánica (figura 1) [10].

Alternativas de materialidad	Componente constructivo	^{"K"} Transmítanci a térmica (W/ m ² K)	Retraso (horas)	Peso superficial (kg/m ²)	Peso específico (kg/m ³)	Amortiguam. (°C dif. temp. máx. exterior y máx. interior)
Caso másico	Muro ladr. común macizo (e=27 cm) revocado ambas caras	1,92	6,01	477	1590	0,19
	Losa cerámica de viguetas (e=19,5 cm.)	2,61	3,11	266	1373	0,43
Caso liviano	Panel sándwich madera c/ lana vidrio 1" (e= 3")	0,91	1,73	19	249	0,60
	Techo chapa c/entretecho y cielorraso madera c/ lana vidrio 1"	0,96	1,49	17	444	0,63
Casos reales habituales (situaciones intermedias entre másica y liviana)	Muro ladr. cerámico hueco (e=18 cm) revocado ambas caras	1,67	3,08	170	809	0,43
	Muro ladr. común macizo (e=18 cm) revocado ambas caras	2,44	3,55	333	1586	0,38
	Techo chapa c/entretecho y cielorraso madera c/ lana vidrio 2"	0,60	2,40	17,5	446	0,51
	Techo chapa c/entretecho y cielorraso madera (sin aislante)	2,4	0,54	16,7	442	0,75

Figura 1. Características y parámetros termo físicos de componentes constructivos de techos y muros para casos térmicamente ligeros [10].

Este artículo propuso el estudio de Fachadas Verdes y techos verdes en un clima tropical para un día frío crítico, mostrando resultados experimentales de cuatro células de prueba en las cuales se midió la temperatura interna de la superficie y el aire interno para hacer posteriormente un estudio comparativo entre esas celdas de prueba con y sin celda de prueba de vegetación. Con los resultados finales, se verificó el potencial de vegetación con respecto a las pérdidas internas de calor.

En períodos en que las temperaturas exteriores más altas del aire se registran, la celda de prueba está equipada con fachadas verdes y el techo muestra la amplitud térmica más baja, es decir, tiene menos dificultad para transferir calor al exterior. El aire más alto interno de las temperaturas del aire se presentan en la celda construida según convenciones y más bajo en la celda con fachadas verdes y techo verde, con una diferencia entre ellos de 1 °C.

Con los resultados obtenidos los investigadores concluyeron que el uso de vegetación en obras de construcción durante el invierno tropical, protege las cubiertas (techos y fachadas) de posibles pérdidas de calor, que, es decir, la vegetación actúa como aislamiento al mejorar las condiciones de confort interno. Y mediante el análisis se pudo observar que las células provistas de planta mantienen su aire interno temperatura casi 2 °C por encima de las otras células en el más frío períodos [11].

DOULA - CAMERÚN

Muchos estudios han demostrado que el uso de la inercia térmica puede modificar útilmente la firma termo física de los edificios. Sin embargo, sus influencias bajo un clima cálido y húmedo con materiales de construcción locales en África no se

han investigado en detalle. Esta investigación se basó en la experimentación y simulación de la inercia térmica de edificios tradicionales con paredes de madera y edificios modernos con paredes de bloques de hormigón sagrado en clima cálido y húmedo. El análisis del estudio experimental muestra: un retraso de tiempo cero y una depreciación de la temperatura de 0.5 °C entre las paredes externas e internas de los edificios de madera; un lapso de tiempo de 04h15min y una depreciación de la temperatura de 1.5 °C entre las paredes externas e internas de los edificios de bloques de hormigón sagrados. El estudio revela que la inercia térmica de los materiales de construcción tiene un impacto real en la temperatura de la superficie de la pared interna del edificio. Muestra que el edificio construido con material tan ligero como la madera es el más adecuado para hogares en climas cálidos y húmedos, ya que con una baja inercia térmica, este tipo de edificio proporciona mayor confort térmico durante horas de ocupación máxima de 6.00 p.m. a 6.00 a.m.; de lo contrario, aquellos con alta inercia térmica, como el bloque de hormigón sagrado, almacenan calor durante el día para descargarlo en la noche en el edificio durante los períodos de ocupación máxima, y por lo tanto crean incomodidad térmica por el mal uso del aire acondicionado en estos tipos de edificios para corregir las molestias térmicas. Los materiales de construcción con alta inercia térmica, como los bloques de hormigón salados, serían más útiles en la construcción de oficinas cuya explotación estará limitada durante el día en climas cálidos y húmedos [12].

GHANA

La mayoría de los edificios de oficinas en los países subsaharianos cálidos y húmedos experimentan una alta carga de enfriamiento debido al uso predominante de bloques de arena que son de baja masa térmica en la construcción y el uso extensivo de acristalamiento. Relativamente, las temperaturas de bajo horario no se aprovechan en los edificios de refrigeración porque las aberturas de las oficinas permanecen cerradas después de las horas de trabajo. Se realizó una optimización a través de una simulación basada en análisis de sensibilidad, utilizando el software de simulación Energy Plus para evaluar los efectos de la masa térmica, el tamaño de la ventana y la ventilación nocturna en la temperatura máxima del aire interior (PIAT).

En este estudio se pudo concluir que los efectos combinados de la masa térmica, el tamaño de la ventana y la ventilación nocturna pueden reducir sinérgicamente la temperatura máxima del aire interior en climas cálidos y húmedos y mejorar el confort térmico. Con las tendencias actuales hacia la sostenibilidad ambiental del diseño de edificios, el estudio es valioso para el diseño de edificios energéticamente eficientes en Ghana. Estos hallazgos podrían guiar a los diseñadores de edificios, posibles constructores y gerentes de instalaciones en la selección del material de envoltura del edificio que mejorará el rendimiento térmico y alcanzará el confort térmico [13].

SALTA - ARGENTINA

Este estudio térmico fue realizado para un día tipo de invierno y uno de verano de un edificio de oficinas de ocho plantas (cinco pisos y tres subsuelos) actualmente en construcción en el microcentro de la ciudad de Salta. El diseño del edificio incluye

doble fachada vidriada en su cara oeste y doble vidriado hermético en su cara este, lo cual hizo presuponer que, para las condiciones climáticas de Salta, se podría producir un excesivo sobrecalentamiento en los meses estivales. Se realizó la simulación térmica mediante el software Energy Plus, encontrándose que se producirá un importante sobrecalentamiento en verano. En invierno se requerirá de calefacción auxiliar sólo en días con baja radiación y bajas temperaturas exteriores. Como soluciones para verano se proponen: una fachada verde en el lado Este, ventilación natural y el uso del aire proveniente de los subsuelos para enfriamiento de la masa térmica del edificio.

El estudio constituyó un gran avance respecto de la interacción entre profesionales privados de la construcción e investigadores para transferir resultados académicos hacia el sector edilicio, particularmente a edificios cuyos consumos energéticos son considerables. En un trabajo futuro se prevé estudiar en mayor profundidad el modelo a utilizar para simular fachadas ventiladas, además de analizar la influencia del follaje de una fachada vegetal en la temperatura del aire cercana al edificio [3].

Se dice que la masa térmica funciona como moderador del clima, ya que las envolventes de edificios masivos pueden atenuar la fluctuación de la temperatura y reducir la temperatura pico interior.

NINGBO - CHINA

Esta investigación estaba vinculada contextualmente a un edificio en Ningbo, China, las inferencias hechas serían útiles para establecer el rendimiento general de la masa térmica en un clima subtropical húmedo que ayudaría a los diseñadores de edificios a diseñar en este clima en cualquier parte del mundo. Sin embargo, como el diseño y el microclima de cada edificio juegan un papel muy importante en su desempeño, existen límites para la generalización de los resultados. Por esta razón, no será aconsejable preparar pautas de diseño basadas en el análisis de un solo edificio. Basado en una metodología similar a la seguida en esta investigación, la investigación adicional puede abarcar el análisis de rendimiento térmico de más edificios institucionales en esta zona climática. Debido a la alta humedad relativa asociada con el clima subtropical húmedo, existe el riesgo de que se produzca condensación debido al contacto del aire húmedo con superficies internas frías en los edificios. Como extensión de este estudio, la investigación adicional puede probar el riesgo de condensación asociado con la construcción ligera y pesada en la zona climática subtropical húmeda [14].

Por lo anterior, el objetivo de este proyecto es investigar sobre los efectos de la masa térmica en edificios ubicados en países con climas tropicales, mediante la utilización del simulador Energy 2D. El distrito de Guntur ubicado en el estado de Andhra Pradesh, en el sur de India, fue el sitio seleccionado para el análisis del efecto de la masa térmica en sus edificaciones, ya que es un lugar que cuenta con un clima tropical de sabana o clima tropical húmedo-seco con variaciones térmicas a lo largo del año.

3. Conceptos fundamentales

Esta sección presenta brevemente definiciones teóricas fundamentales para el análisis de la influencia de la masa térmica.

3.1 Masa térmica

La masa térmica es definida como “la capacidad de los materiales de acumular y liberar calor progresivamente, es decir, la cantidad de calor que puede conservar un cuerpo y la velocidad con que la cede o absorbe del entorno” [15].

3.2 Masa térmica en edificaciones

“Desde el punto de vista de la termodinámica, un edificio generalmente se considera como un conjunto de subsistemas o zonas térmicas” que se encuentran compuestas por elementos con conductancia específica e inercia térmica [16]. “En cuanto a la inercia térmica esta se refiere a la propiedad que adquiere el edificio para amortiguar la influencia de la temperatura exterior sobre las condiciones térmicas interiores” (figura 2) [15].

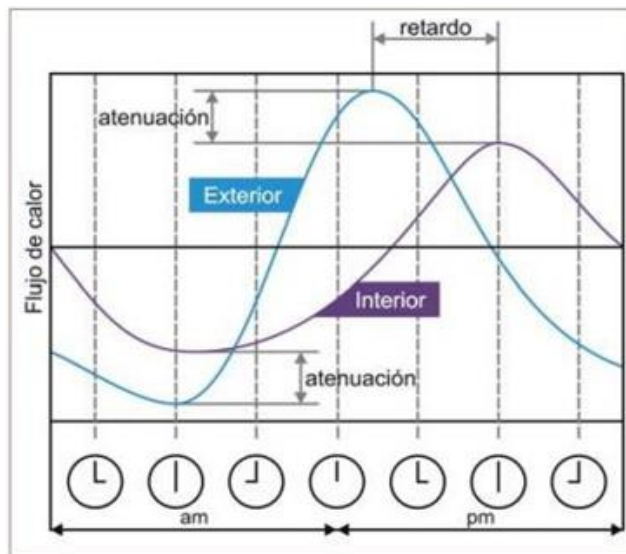


Figura 2. La influencia de la masa térmica sobre el confort. Para que se active, es necesario que exista un gradiente térmico entre el día y la noche [15].

3.3 Elementos

Estos elementos de inercia térmica se pueden clasificar en tres categorías: envoltura de zona térmica, volumen de aire interior y masa térmica interior.

La envoltura de la zona térmica está conformada por las piezas de construcción como paredes externas, pisos, techos o paredes divisorias y poseen, por lo general, una inercia térmica significativa. “La masa térmica externa de la envoltura del edificio está expuesta al ambiente exterior e interior. No es isotérmico y su energía interna varía lentamente.

El volumen de aire interior es aquel que se encuentra contenido dentro de una zona térmica y que generalmente se considera como un solo nodo con temperatura homogénea. “La temperatura del aire interior puede variar rápidamente debido a su limitada inercia térmica”.

En el caso de la masa térmica interior, esta se compone de todo el mobiliario y artículos que estén dentro de la edificación y que generen y/o absorban calor. Exceptuando “el cuerpo de seres vivos, objetos móviles, que entran y salen de la zona varias veces al día, terminales de HVAC (radiadores, unidades de tratamiento de aire) y todos los equipos que emiten energía térmica (computadora, ventilador, motores, iluminación, lámparas)”.

Para el estudio y análisis de la masa térmica exterior, se considerarán únicamente los modelos numéricos actuales que tengan en cuenta la inercia térmica de la envoltura, los pisos, techos y las paredes. La zona térmica interior compuesta por el mobiliario y la masa adicional presente en un edificio ocupado real no se incluyen en este caso. “Esta suposición es razonable para el diseño clásico y el análisis de energía de edificios basados en cálculos estables o simplificados a largo plazo” [16].

3.4 Materiales

Para obtener edificios energéticamente eficientes se debe seleccionar materiales que poseen inercia térmica, ya que esta propiedad reduce las variaciones extremas de temperatura que puedan ocurrir durante el día. Con ella también se puede almacenar calor y limitar el sobrecalentamiento en verano. Lo que significa que, “la masa térmica incorporada en un edificio proporciona una temperatura interior más estable y permite ahorrar energía cuando se suministra calefacción o refrigeración”.

En los edificios, el calor y la frialdad se almacenan tradicionalmente mediante calor sensible. Estas propiedades están actualmente restringidas, al menos como primer paso en los procedimientos de selección de materiales habituales, a su capacidad de almacenamiento y su densidad (figura 3).

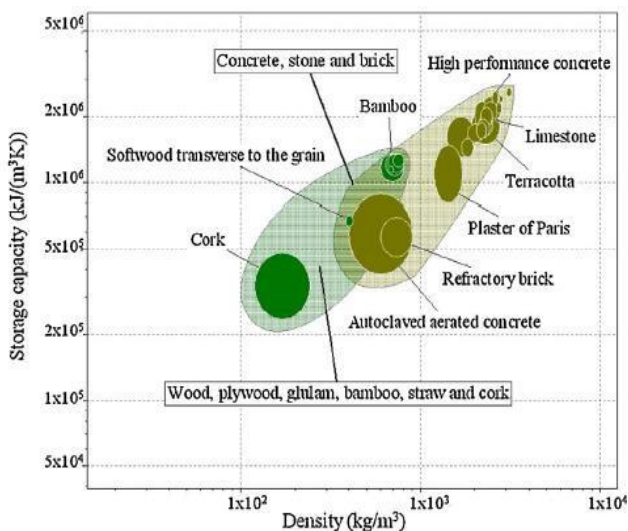


Figura 3. Capacidad de almacenamiento en función de la densidad para materiales de construcción convencionales [17].

“La capacidad de almacenamiento se define como la capacidad de un material para almacenar calor o frío por unidad de masa y variación de temperatura. La densidad está relacionada con la masa que podría colocarse en un volumen unitario y, por lo tanto, con la compacidad del material. La más alta podría ser la capacidad de almacenamiento y / o la densidad; la más pequeña sería la cantidad de material necesaria para almacenar una cantidad específica de energía” [17].

4. Metodología

Para cumplir con los objetivos anteriormente plasmados en este estudio científico, se desarrolló la siguiente metodología con la finalidad de obtener los datos necesarios para posterior simulación en el software Energy 2D.

4.1 Selección del sitio según zona climática

El distrito de Guntur ubicado en el estado de Andhra Pradesh, en el sur de India, fue el sitio seleccionado para el análisis del efecto de la masa térmica en sus edificaciones, ya que es un lugar que cuenta con un clima tropical de sabana o clima tropical húmedo-seco con variaciones térmicas a lo largo del año [18]. En la India, la mayor parte de sus edificaciones residenciales y comerciales representan aproximadamente el 30% de su electricidad, donde si bien es cierto, no es posible eliminar en su totalidad la utilización del aire acondicionado y de la calefacción en este país, dada la ubicación en el cinturón tropical y subtropical, pero si es posible reducir el consumo a través del diseño adecuado de estos edificios al disminuir la transferencia de calor entre el interior y el exterior; esto se puede lograr aumentando el aislamiento o aumentando la masa térmica en sus paredes [19]. Su temperatura media anual es de 28.5 °C, el mes más caliente del año es mayo con aproximadamente 33.6°C y el más frío cuenta con una temperatura de 24°C [18].

4.2 Tipos de materiales

Las propiedades básicas que indican el comportamiento térmico de los materiales son: densidad (ρ), calor específico (cp) y la conductividad (k). A continuación, los materiales que se utilizarán para la simulación del modelo se muestran en la Tabla 1 [20]. Con la finalidad de observar el impacto que tiene el material sobre la climatización.

4.3 Parámetros físicos y térmicos

Estos parámetros ayudan a un mejor análisis del clima y a evaluar las estaciones o períodos durante los cuales una persona puede experimentar condiciones relacionadas al confort térmico. Las variables mencionadas se resumen en la Tabla 2 [21]; éstas influirán eventualmente en el rendimiento térmico exterior e interior.

4.4 Ecuaciones

Es importante estimar el comportamiento térmico de las diferentes zonas que conforman el edificio, ya que esto permitirá analizar los sistemas de climatización de refrigeración, calefacción, evolución de temperaturas; por la influencia de la masa térmica [22]. Para caracterizar estos niveles se deben tomar

en cuenta parámetros propios que involucren almacenamiento de calor y que proporcionen la inercia necesaria para fluctuaciones provocadas por la temperatura. Entre estos tenemos:

Conducción-Transmitancia térmica: Corresponde a condiciones en las que las temperaturas interiores y exteriores son estables en el tiempo, o cuando existe una diferencia promedio durante un largo plazo. La ecuación de la conducción se resuelve para cada elemento constituyente (externo) de la edificación, es decir cada pared, techo, piso. Donde los resultados se resumen a que el flujo de calor a través de la envoltura del edificio por conducción es la suma del área y los productos de valor U de todos los elementos del edificio multiplicados por la diferencia de temperatura.

Inercia térmica: “Expresa la magnitud del efecto para amortiguar y retardar la temperatura máxima en el interior de un espacio en relación con la temperatura exterior” permite reducir el uso de sistemas mecánicos de calefacción por la capacidad de los elementos para almacenar calor.

Convección-Flujo de calor por ventilación: Debido a las infiltraciones de aire en puertas, ventanas, las cuales representan de un 10 a 50% de las pérdidas de calor totales.

Radiación-Temperatura sol-aire: Esta “combina los efectos de la temperatura caliente del aire y la radiación solar incidente, se utiliza para el cálculo de flujo de calor cuando se refiere a superficies que reciben algún tipo de radiación solar.

Factor de ganancia solar Q/L: “Es la cantidad de radiación solar transmitida a través de la envolvente de la construcción., influye en la temperatura interior de los elementos y en el calentamiento del aire y otras superficies interiores [23].

Tabla 1. Descripción de las propiedades térmicas de los materiales [20].

Material	Densidad kg/m^3	Conductividad W/mK	Calor específico J/KgK
Ladrillo quemado	1820	0.811	880
Mortero Cemento	1648	0.719	920
Hormigón reforzado	2410	1.1	840
Plywood	640	0.174	1760
Madera	480	0.072	1680
Yeso de cemento	1762	0.721	840

Tabla 2. Descripción de los parámetros utilizados en la simulación [21].

Parámetros	Valor
Temperatura	28.5°C
Velocidad del viento	9.4 -18.2 km/h
Ángulo de los rayos del Sol	135°
humedad	36-52%
Orientación	Este

5. Análisis de resultados

A continuación, se presenta el análisis de resultados para las situaciones estudiada.

5.1 Evaluación con una fuente de calor por conducción

Los materiales que se muestran en la tabla 1 fueron los seleccionados para realizar la simulación; a cada material se le determinó el tiempo en alcanzar la temperatura de 32°C (T1). El material a estudiar se aisló junto con la fuente para lograr un mayor resultado, se estableció el clima tropical inicial de 28.5°C y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Tiempo de materiales

Material	Tiempo (s)
Ladrillo	183000
Mortero	176500
Hormigón	178500
Plywood	531500
Madera	882500
Yeso	187000

En la figura 4, se comparó el material con mayor contenido de masa térmica a través del tiempo, en donde predominó la madera con un 41%.

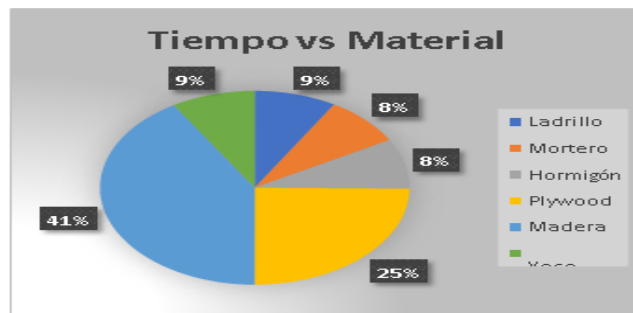


Figura 4. Resultados de la conducción de materiales

Se evaluó la temperatura de la fuente de 60°C y la temperatura del material T2 a través de un determinado tiempo.

En la figura 5 (izquierda), se observa el comportamiento entre las temperaturas y en la figura 5 (derecha), se presenta la simulación en la fase final, donde el segmento rosado representa el aislante, el segmento blanco representa la fuente de calor (temperatura, línea en color naranja) y el azul el material (temperatura, línea en color azul), se estableció suspender el tiempo una vez material llegara a una temperatura aproximada de 32°C.

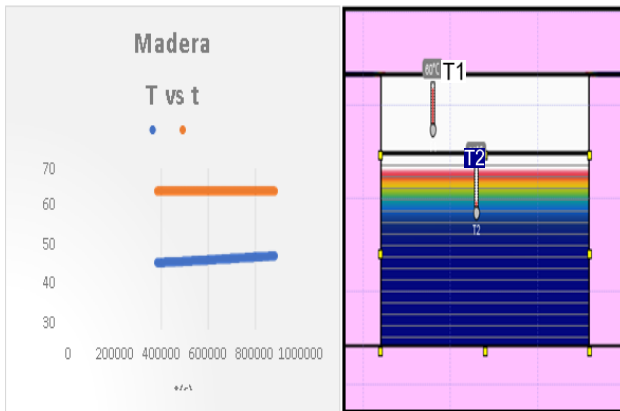


Figura 5. Componentes del material a diferentes temperaturas durante el tiempo (izquierda) y simulación de conducción en Energy 2D (derecha).

5.2 Evaluación con una fuente de calor por radiación

Se determinó el tiempo en alcanzar una temperatura de 29°C (T1) en el interior de la casa, donde la fuente de calor proviene de los rayos del Sol. Se simularon los materiales presentados en la tabla 1 y también se estableció el clima tropical inicial de 28.5°C.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4. En la figura 6, se presenta una comparación del tiempo, con el método de la simulación de la masa térmica del material, el cual fue colocado en las paredes y el techo, en donde se pudo observar que el material predominante fue el hormigón con un 30%.

Tabla 4. Tiempo de materiales.

Material	Tiempo (s)
Ladrillo	610
Mortero	610
Hormigón	670
Plywood	510
Madera	490
Yeso	600

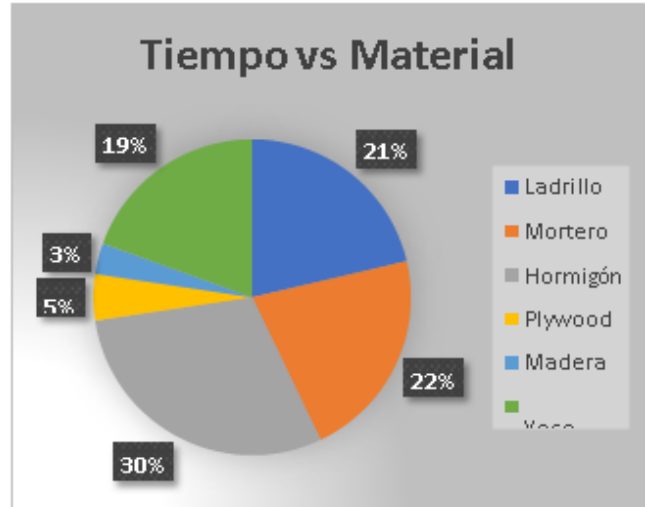


Figura 6. Resultado de la radiación en los materiales.

En la figura 7, se observa que, al ejecutar la simulación, la temperatura del medio se mantiene constante, ya que se contempló una temperatura exterior constante.

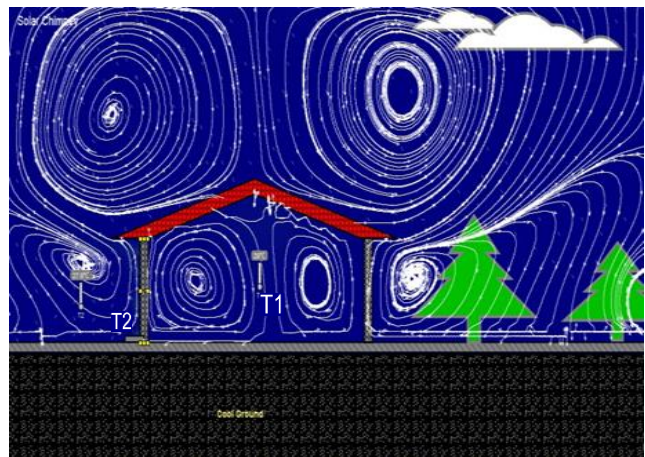


Figura 7. Ejemplo de simulación en Energy 2D usado para convección y radiación como fuente de calor.

5.3 Evaluación con una fuente de calor convectiva

Se determinó el tiempo del material en alcanzar la temperatura promedio de 29°C (T2) mediante un medio convectivo, donde la fuente tiene una temperatura constante de 60°C (T1). El material a estudiar se colocó como pared interna de 0.1 cm de espesor. También se simularon los materiales descritos en la tabla 1 y se estableció el clima tropical inicial de 28.5°C. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.

En la figura 8, se compara el material con mayor contenido de masa térmica a través del tiempo, en donde predominó el hormigón con un 19%.

Tabla 5. Tiempo de materiales

Material	tiempo (s)
Ladrillo	4050
Mortero	4100
Hormigón	5650
Plywood	900
Madera	600
Yeso	3700

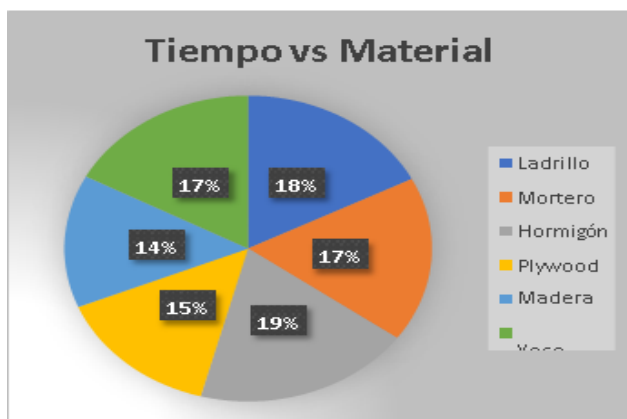


Figura 8. Resultados de la convección de materiales.

6. Discusión

Como se puede observar en la figura 5, donde se aplica conducción mediante la simulación con Energy 2D, se obtiene como resultado que el mejor material a utilizar en este caso con un clima tropical es la madera. La razón radica en sus propiedades, ya que posee una conductividad térmica de 0.072 W/mK que es menor a la de los demás materiales presentados, lo que significa que posee una menor capacidad para conducir calor del exterior al interior de la edificación. Además, su calor específico es elevado (1680 J/kgK), lo que indica que posee una mayor capacidad para almacenar energía térmica.

Al comparar este resultado obtenido con el simulador Energy 2D y los resultados del estudio realizado en la ciudad de Douala en Camerún, la cual presenta condiciones climáticas similares a las del distrito de Guntur en la India y al clima de algunas regiones de Panamá, se pudo comprobar que la madera tiene un impacto real en la temperatura y resulta ser el más adecuado para hogares en climas cálidos y húmedos, ya que al poseer una baja inercia térmica, este tipo de edificio proporciona mayor confort térmico durante horas de ocupación máxima [12]. En la Ciudad de Panamá se pueden observar viviendas en base de madera, cerca del área del Canal de Panamá que fueron edificadas en conjunto con estrategias bioclimáticas. Estas viviendas presentaron mejor desempeño cuando fueron comparadas con las estrategias de construcción usadas actualmente [24].

En cuanto al mecanismo de radiación, donde la fuente de calor provenía principalmente de los rayos del Sol, el material que

tardó más tiempo en calentar el interior fue el hormigón reforzado. Esto ocurre debido a que posee una mayor densidad en comparación con los otros materiales y esto impidió que el calor producto de los rayos solares traspasara el material fácilmente.

Conclusión

Se realizó la revisión literaria, sobre la variación del comportamiento de la masa térmica en edificaciones ubicadas en regiones con clima tropical húmedo, en relación a los mecanismos de transferencia de calor de conducción, convección y radiación, utilizando el software “Energy 2D”, tomando como base comparativa diferentes materiales de construcción, en relación a las propiedades térmicas de estos. Esto demostró que la masa térmica es un factor importante y beneficioso al momento de buscar ahorro y eficiencia energética en climas tropicales.

En zonas con climas tropicales húmedos, se busca construir los edificios utilizando materiales que ayuden a mantener el confort de los huéspedes en cuestión, para esto se deben tomar en cuenta las temperaturas del interior y exterior de la edificación, como también conocer si existen áreas en el edificio que sean más propensas a las incidencias solares debido a la ubicación. Se recomienda realizar un estudio similar en Panamá, específicamente en las zonas de la península de Azuero, ya que presenta también condiciones climáticas de tropicales de sabana, y posteriormente realizar una comparación con los resultados aquí presentados.

Según los resultados obtenidos con el software Energy 2D, la madera resultó, en efecto, la mejor opción de material en la transferencia de calor por conducción, gracias a su baja conductividad, ya que en estos climas precisamente lo que se busca es conducir menos calor del exterior hacia el interior de las edificaciones. Sin embargo, en términos de radiación el hormigón reforzado es más favorable, debido a que, gracias a su alta densidad, los rayos solares, no penetran con tanta facilidad al material; el resultado fue similar en la convección donde al estar involucrado el fluido caliente que rodea el área superficial a la que se le transfiere calor, el hormigón reforzado resultó también la mejor opción de material, según las simulaciones realizadas.

Referencias

- [1] Reilly y O. Kinnane, «The impact of thermal mass on building energy consumption», Appl. Energy, vol. 198, pp. 108-121, jul. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.04.024.
- [2] M. C. Mendoza Cardenas, «Evaluación del impacto del uso de estrategias de climatización pasiva en el consumo de energía eléctrica de dispositivos de acondicionamiento de aire en viviendas en Monterrey», Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, 2016.
- [3] S. F. Larsen, L. Rengifo, y L. G. Paz, «SIMULACION TERMICA DE UN EDIFICIO DE OFICINAS CON DOBLE FACHADA VIDRIADA EN LA CIUDAD DE SALTA», p. 8.
- [4] «Nivel de masa térmica en los edificios». <https://www.seiscubos.com/conocimiento/nivel-de-masa-termica> (accedido jun. 12, 2020).
- [5] [W. Rattanongphisat y W. Rordprapat, «Strategy for Energy Efficient Buildings in Tropical Climate», Energy Procedia, vol. 52, pp. 10-17, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.07.049.
- [6] B. Kasatsuk, «Research and Development in the field of energy conservation and renewable energy in thailand». [En línea]. Disponible en: <http://weben.dede.go.th/webmax/sites/default/files/artall-eng%203.pdf>.

- [7] S. Chiraratananon y V. D. Hien, «Thermal performance and cost effectiveness of massive walls under thai climate», *Energy Build.*, vol. 43, n.o 7, pp. 1655-1662, jul. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.03.010.
- [8] «Clima Bangkok: Temperatura, Climograma y Tabla climática para Bangkok - Climate-Data.org». <https://es.climate-data.org/asia/tailandia/bangkok/bangkok-6313/> (accedido jun. 16, 2020).
- [9] «Buildings | Free Full-Text | Bioclimatic Analysis in Pre- Design Stage of Passive House in Indonesia | HTML». <https://www.mdpi.com/2075-5309/7/1/24/html> (accedido jun. 16, 2020).
- [10] H. M. Alias y G. J. Jacobo, «La masa térmica frente al clima muy cálido y húmedo y el uso mixto en viviendas», p. 6.
- [11] N. P. Gallardo, A. Rogério, G. F. Neves, F. A. Vecchia, y V. F. Roriz, «Thermal Response to cold in buildings with Green covers for tropical climate. Green facades and green roofs Reacción frente al frío de edificaciones con envoltantes vegetales para climas tropicales. Fachadas verdes y cubiertas ajardinadas», vol. 33, p. 14, 2018.
- [12] A. Kemajou, «REAL IMPACT OF THE THERMAL INERTIA ON THE INTERNAL AMBIENT TEMPERATURE OF THE BUILDING IN THE HOT HUMID CLIMATE: SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY IN THE CITY OF DOUALA IN CAMEROON», p. 10, 2012.
- [13] S. Amos-Abanyie, F. O. Akuffo, y V. Kutin-Sanwu, «Effects of Thermal Mass, Window Size, and Night-Time Ventilation on Peak Indoor Air Temperature in the Warm- Humid Climate of Ghana», *Sci. World J.*, vol. 2013, pp. 1-9, 2013, doi: 10.1155/2013/621095.
- [14] N. Baderia, «The Role of Thermal Mass in Humid Subtropical Climate: Thermal Performance and Energy Demand of CSET Building, Ningbo», p. 8, 2014.
- [15] A. L. Vidal, «Una característica no aprovechada en los elementos prefabricados de hormigón: la masa térmica», p. 6, 2015.
- [16] H. Johra y P. Heiselberg, «Influence of internal thermal mass on the indoor thermal dynamics and integration of phase change materials in furniture for building energy storage: A review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, pp. 19-32, mar. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.145.
- [17] A. Jeanjean, R. Olives, y X. Py, «Selection criteria of thermal mass materials for low- energy building construction applied to conventional and alternative materials», *Energy Build.*, vol. 63, pp. 36-48, ago. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.03.047.
- [18] «Clima Andhra Pradesh: Climograma, Temperatura y Tabla climática para Andhra Pradesh - Climate-Data.org». <https://es.climate-data.org/asia/india/andhra-pradesh-760/>(accedido jul. 16, 2020).
- [19] «De-coding Thermal Mass and R-Value for Optimizing Building Efficiency | sustainabilityoutlook.in». <http://www.sustainabilityoutlook.in/content/de-coding-thermal-mass-and-r-value-optimizing-building-efficiency-560331> (accedido jul. 16, 2020).
- [20] J. K. Nayak y J. A. Prajapati, «HANDBOOK ON ENERGY CONSCIOUS BUILDINGS», p. 397.
- [21] «Clima promedio en Guntur, India, durante todo el año - Weather Spark». <https://es.weatherspark.com/y/110155/Clima-promedio-en-Guntur-India-durante-todo-el-a%C3%B1o> (accedido jul. 16, 2020).
- [22] Asociación Técnica Española de Climatización, «Procedimiento y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas de edificios». 2008, [En línea]. Disponible en: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_13_Guia_tecnica_Procedimientos_y_aspectos_de_la_simulacion_termicas_en_edificios_72a7f4d6.pdf.
- [23] C. Valdiviezo, «Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco, México, D. F. Grupo de investigación Espacios habitables y medioambiente», p. 12, 2010.
- [24] M. Chen Austin, M. Castillo, A. de Mendes Da Silva, y D. Mora, «Numerical Assessment of Bioclimatic Architecture Strategies for Buildings Design in Tropical Climates: A Case of Study in Panama», 75th National ATI Congress, Roma Italia, E3S Web of Conferences 197, 02006 (2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019702006>