

## Potencial de ahorro energético del estándar Passivhaus en climas tropicales cálidos húmedos

Jairo Esteban Posada Gomez

### *Abstract*

*This article evaluate the energy saving potential of the application of the Passivhaus standard in tropical warm climates in Latin America. By simulating a base case in 3 tropical warm and humid cities representative of different Latin American countries, assessing their conditions of energy saving, improving interior hygrothermal comfort and applicability. Compliance with a standard of low energy constructions would reduce the energy demand associated with refrigeration in homes and improve the construction quality of the homes providing improvements in interior comfort and significantly reducing greenhouse gases associated with energy consumption of buildings.*

*Index terms*— Passivhaus - Energy efficiency- Passive housing- Hygrothermal comfort.

### *Resumen*

El presente artículo muestra la evaluación del potencial de ahorro energético de la aplicación del estándar Passivhaus en climas tropicales húmedos en Latinoamérica. Mediante la simulación de un caso base situado en 3 ciudades tropicales, cálidas y húmedas, representativas de distintos países latinoamericanos, valorando sus condiciones de ahorro energético, mejoramiento del confort higrotérmico interior y aplicabilidad. Se considera que la aplicación de un estándar de construcción de bajo consumo energético permitiría disminuir la demanda energética asociada a refrigeración en las viviendas y mejoraría la calidad constructiva de las mismas aportando mejoras en el confort interior y reduciendo significativamente los gases efecto invernadero asociados al consumo energético de las edificaciones.

*Palabras clave*— Passivhaus - Eficiencia energética- Vivienda Pasiva- Confort higrotérmico.

## 1. INTRODUCCIÓN

El incremento de los efectos del cambio climático y la contaminación de los ecosistemas nos pone en la necesidad de reducir los gases efecto invernadero, en ese sentido la industria de la edificación, como uno de los principales causantes y frente a su vulnerabilidad ante el cambio climático, desempeña un papel importante en la reducción de los mismos, actualmente la construcción sostenible, su verificación y comprobación mediante el uso de certificaciones, se ha masificado a nivel mundial; en Latinoamérica cada vez tiene mayor fuerza el sello LEED y más recientemente el uso de EDGE del IFC, considerándose avances importantes para el sector; múltiples certificaciones podrían llegar a tener impactos significativos en la reducción del consumo energético de las edificaciones, tal es el caso de la certificación Passivhaus originada en Alemania.

El estándar Passivhaus es cada vez más usado alrededor del mundo, al ser una forma de lograr edificios de consumo energético casi nulo NZEB (por sus siglas en inglés) y con la normativa vigente en Europa desde el 31 de diciembre del 2018, las edificaciones públicas nuevas tienen la obligación de ser NZEB y a partir del 31 de diciembre de 2020, la legislación se extiende a todas las nuevas edificaciones. Por esta razón y por la posibilidad de que los ahorros energéticos en refrigeración podrían llegar a ser muy significativos, parece pertinente estudiar el potencial del estándar en climas tropicales cálidos, los cuales se comportan similar a un verano permanente durante todo el año.

### 1.1. Problema de estudio

En Latinoamérica encontramos muchas poblaciones situadas en zonas climáticas tropicales, que se podrían denominar “happy Climate” o con un clima muy favorable que no necesita de grandes modificaciones en la arquitectura para mantener una temperatura adecuada al interior de las edificaciones.

Las condiciones climáticas están en mayor proporción determinadas por la altitud sobre el nivel del mar, encontrando desde climas de alta montaña en condiciones de baja temperatura, hasta climas a menor altitud donde la temperatura es alta durante todo el año y el uso energético para refrigeración es frecuente; en las dos situaciones, las edificaciones tienen problemas de confort térmico para los que se podrían desarrollar soluciones pasivas y activas. En la actualidad, es muy poco el uso de energía para regular la temperatura en las zonas climáticas frías; caso contrario, sucede en las poblaciones ubicadas a menor altitud donde el uso energético para refrigeración es ineficiente y responde al inexistente uso de estrategias pasivas.

### 1.2. Marco teórico

El potencial de ahorro energético del estándar de construcción Passivhaus, puede extenderse hasta llegar a ser un edificio energía cero, incluso energía positiva mediante el apoyo de paneles fotovoltaicos, representa un modelo de construcción energéticamente eficiente, sostenible y ecológico para viviendas [1].

Un estudio ha sugerido que el estándar Passivhaus en climas cálidos secos es potencialmente viable [2]; de igual manera, la aplicación de Passivhaus en climas mediterráneos, encontró que el estándar tiene grandes impactos de reducción de energía en invierno, caso contrario a lo que sucedió en verano, en que el impacto en la disminución de consumo energético por refrigeración fue bajo o nulo [3][4]. En clima tropical, el aire exterior generalmente requiere procesos de enfriamiento y deshumidificación antes de suministrar el aire al espacio interior [5][6]; por lo tanto, una gran proporción de la energía del edificio se consume para el aire de ventilación de acondicionamiento [7][8].

Queda claro que el estándar Passivhaus, necesita ver las necesidades específicas para

cada clima y adaptar estrategias pasivas para cada proyecto, como es afirmado en una investigación en donde se demuestra lo diferente que puede ser la aplicación del estándar en un clima continental y otro Mediterráneo [9]; sin embargo, para un clima tropical húmedo, es necesario considerar la demanda energética adicional por deshumidificación; en un estudio para el caso de Singapur, se obtuvo como resultado que con la aplicación del estándar se logró un 77% de ahorro de energía en climatización, con un consumo en refrigeración de 38.7 kwh/(m<sup>2</sup>a) y una carga de 6.4 w/m<sup>2</sup> y en deshumidificación un consumo de 30.7 kwh/(m<sup>2</sup>a) y una carga de 4.3 w/m<sup>2</sup> [10].

A pesar de obtener ahorros grandes en energía con la aplicación del Passivhaus en climas tropicales cálidos húmedos, lo más destacable es la carga tan pequeña, lo que podría ayudar a reducir significativamente la potencia de los equipos instalados y con ello, el costo de construcción en climatización para edificaciones, por lo que sería de suma importancia hacer un análisis costo-efectivo de la aplicación del estándar. Después de los hallazgos obtenidos y teniendo en cuenta que Passivhaus, no se caracteriza solo por el ahorro energético sino también, la calidad constructiva, la disminución de patologías que podrían ocasionarse en la construcción y el aumento del confort térmico interior; Se considera que, por el alto consumo energético, que para el caso anterior significa 69.4 kwh, asociado a estrategias de diseño adaptadas al clima, el consumo energético puede disminuir con la aplicación de diversas modificaciones en física de la construcción.

El ahorro energético asociado a la aplicación del estándar Passivhaus representaría entonces una importante reducción de gases efecto invernadero, que dependiendo de su aplicación en la región presenta un potencial importante frente a las metas de los países en su compromiso de mitigación y adaptación al cambio climático.

## 2. METODOLOGÍA

Se seleccionó como caso de estudio una vivienda desarrollada dentro del marco de un concurso para un clima tropical de alta montaña; la simulación de la misma tal cual está diseñada va a hacer el caso base a utilizar, posteriormente se le adaptan estrategias de funcionamiento para un clima cálido húmedo, estas estrategias son revisadas mediante simulaciones energéticas desarrolladas el software PHPP (Passive House Planning Package), software desarrollado por el Passivhaus Institute, el uso del mismo es necesario para el diseño y certificación de edificios en el estándar, la simulación semi-estática, otorga para el análisis, datos de la demanda energética del edificio mes a mes, de acuerdo a parámetros de ocupación.

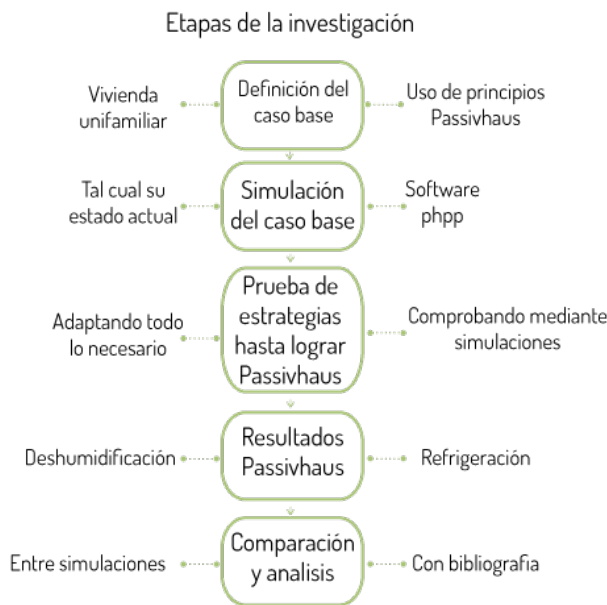
Las estrategias son probadas hasta llegar a medidas que cumplan con las condiciones mínimas para poder certificar la vivienda; en el momento en que estas estrategias estén funcionando de la manera correcta, se explican detalladamente y esta vivienda se simula en diferentes ciudades con características climáticas similares para obtener los resultados de su funcionamiento, consumos energéticos y realizar la comparación de los mismos.

El potencial de ahorro energético del estándar; se comparará con los datos obtenidos en la vivienda inicial (caso base).

### 2.1. Etapas de investigación

Como indica la Fig.1 La presente investigación se desarrolla en 5 etapas, La primera es la definición del caso base, mediante el uso de un prototipo de vivienda unifamiliar; la segunda etapa es la simulación del caso base en el clima cálido húmedo de la ciudad de Barranquilla, la tercera etapa comprende la aplicación de estrategias del estándar de construcción Passivhaus hasta cumplir los requerimientos de certificación (la etapa 2 y 3 se realiza solo en Barranquilla); la cuarta etapa consiste en la simulación de la vivienda que cumple con los parámetros de certificación en dos ciudades Latinoamericanas con clima cálido húmedo:

Ciudad de Panamá y Guayaquil; los criterios de selección de estas dos ciudades representativas en sus países es la similitud con los datos climáticos de Barranquilla, se considera que la aplicabilidad del presente artículo puede extenderse a climas cálidos húmedos de otras ciudades; finalmente en la quinta etapa se realiza el análisis y comparación de los resultados obtenidos y la cuantificación del potencial energético con respecto al caso base.



**Figura 1: Etapas de investigación.**  
Fuente: elaboración propia.

### 3. DESCRIPCIÓN DE LOS PARAMETROS A UTILIZAR PARA EL ESTUDIO

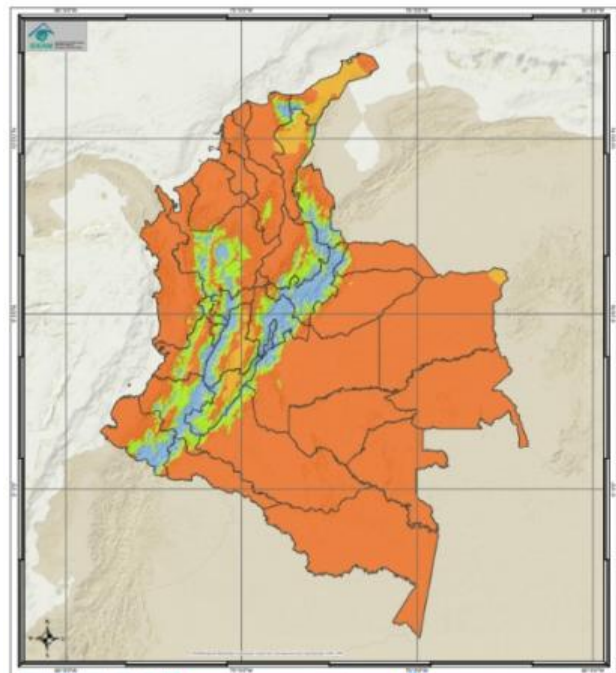
De acuerdo con los últimos datos del censo desarrollado por el Departamento Administrativo Nacional, DANE, el 36,21% de los hogares en Colombia presentó necesidades habitacionales, el déficit cualitativo de la vivienda rural en Colombia requiere especial énfasis en el confort ambiental interior, los planes de mejoramiento de vivienda rural desarrollados por el Estado colombiano cumplen la función de subsidiar la ampliación de la vivienda, sin criterios de diseño sostenible ni un análisis de las condiciones de habitabilidad.

De acuerdo a la Resolución 0549 de 2015

realizada por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, el cual establece la guía de ahorro de agua y energía en las edificaciones, dice que para el 2017 se debe considerar un ahorro energético de 45% con respecto a la línea base de viviendas; esta guía además establece la zonificación del territorio nacional en 4 climas, como lo indica la Fig.2

Tipo de clima	Temperatura (°C)	Altitud (msnm)	Ciudad representativa
Frío	12 - 18	2000m - 2999m	Bogotá (2625m)
Templado	18 - 24	1000m - 1999m	Medellin (1495m)
Cálido seco	> 24; HR < 75%	< 1000m	Cali (997m)
Cálido húmedo	> 24; HR > 75%	< 1000m	Barranquilla (18m)

**Figura 2: Clasificación climática Guía de ahorro de agua y energía. Resolución 0549 de 2015**



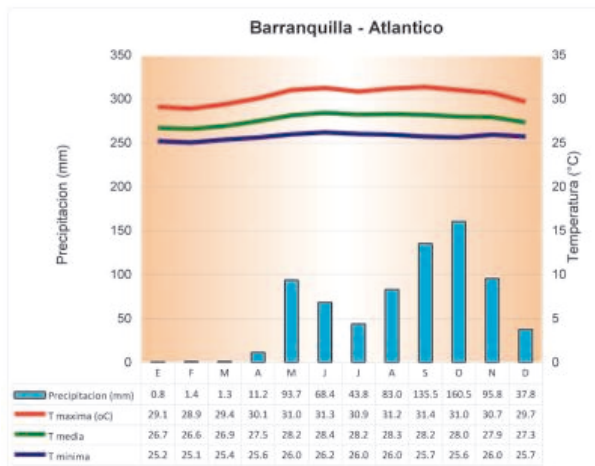
**Figura 3: Zonificación de acuerdo a clasificación Climática. Fuente: IDEAM**

De acuerdo a la Fig. 3, una proporción importante del territorio nacional se encuentra en la clasificación climática del clima cálido húmedo (color naranja), siendo para esta guía, la ciudad de Barranquilla la ciudad característica del mismo.

#### 3.1. Clima de Barranquilla

Se seleccionó la ciudad de Barranquilla por ser la más grande en Colombia ubicada en un clima cálido húmedo, en este caso valida por

su representatividad y usada como ejemplo de lo que podría pasar en ciudades con características climáticas similares.



**Figura 4: Climograma de Barranquilla-Atlántico.**  
Fuente: IDEAM

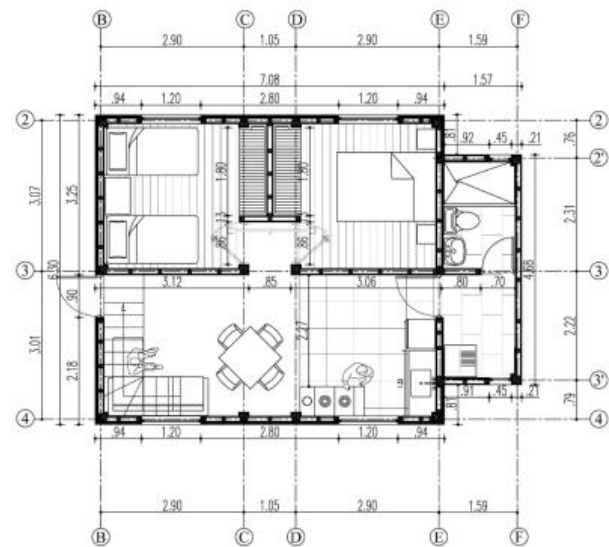
De acuerdo a la Fig. 4. La ciudad de Barranquilla se caracteriza por tener una temperatura estable a lo largo del año, la temperatura promedio anual es de 27.2 °C, con un periodo de bajas precipitaciones en el primer trimestre del año, y una temporada de lluvias en los meses de septiembre, octubre y noviembre alcanzando los 160.5 milímetros mensuales.

### 3.2. Caso de estudio

En el marco del CONCURSO PÚBLICO DE IDEAS PARA EL DISEÑO DE PROTOTIPOS DE UNIDADES HABITACIONALES SOSTENIBLES Y PRODUCTIVAS PARA LA RURALIDAD DEL DISTRITO CAPITAL, Organizado por la Sociedad Colombiana de Arquitectos y la Secretaría Distrital de Planeación, las propuestas presentadas se desarrollaron para climas de la ruralidad de Bogotá Colombia, las cuales debían adaptarse a tres climas tropicales similares de alta montaña; para la presente investigación se retoma la propuesta desarrollada por el equipo autor y se adapta para el cumplimiento de los criterios de certificación Passivhaus.

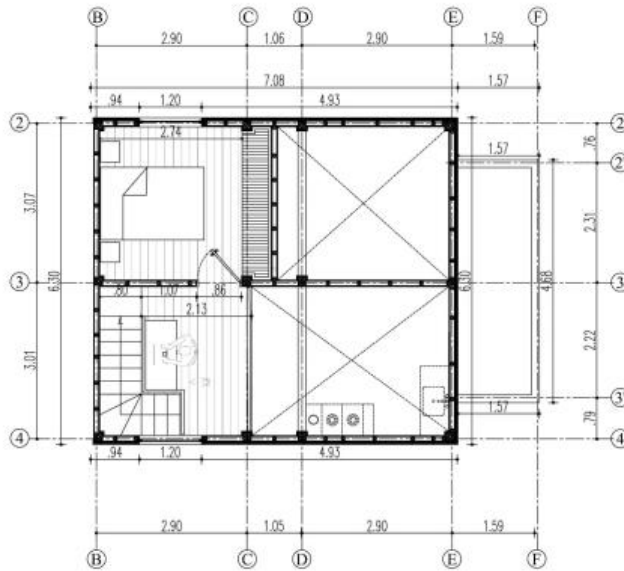
Dado el que la propuesta enviada al concurso cumple con los criterios de

hermeticidad al paso del aire, disminución de los puentes térmicos, buen aislamiento térmico, ventanas de altas prestaciones, que son 4 de los 5 principios del estándar y para el clima frío logra un ahorro de hasta el 79% de la demanda energética por calefacción, se considera pertinente el estudio de la unidad de vivienda en distintos climas entre ellos el más desfavorable y que supone el mayor consumo de energía por concepto de refrigeración, como es el clima cálido húmedo.



**Figura 5: Planta de primer nivel vivienda.** Fuente: elaboración propia.

Es una vivienda que consta de dos niveles, cocina, comedor, dos habitaciones, baño y lavandería en el primer nivel con 51.8 m<sup>2</sup> construidos, como se indica en la Fig.5, estudio y una habitación adicional en el segundo nivel con 17.5 m<sup>2</sup> construidos, como lo indica la Fig 6. para un total de: 69.3m<sup>2</sup> construidos.



**Figura 6: Planta de segundo nivel vivienda. Fuente: elaboración propia.**

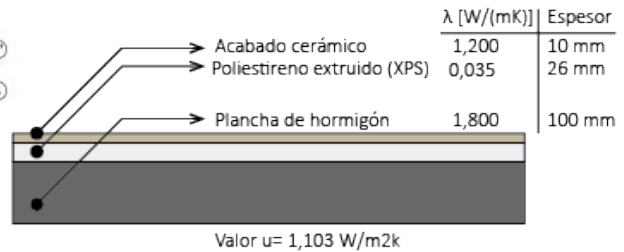
Es de suponer entonces que, al tratarse de un prototipo de una vivienda pequeña, de morfología principalmente compacta, puede presentar cambios en la configuración de su envolvente para permitir la evaluación bajo el estándar de Passivhaus, además, la condición de vivienda aislada sin intervenciones de colindantes que pudieran afectar el funcionamiento energético de la misma, permite el análisis a manera de prototipo cuyas aplicaciones pueden variar incluso en su aplicación en distintos climas.



**Figura 7: Imagen exterior. Fuente: Prototipo de vivienda rural sostenible-Secretaría Distrital de Planeación SDP de la Alcaldía mayor de Bogotá D.C.**

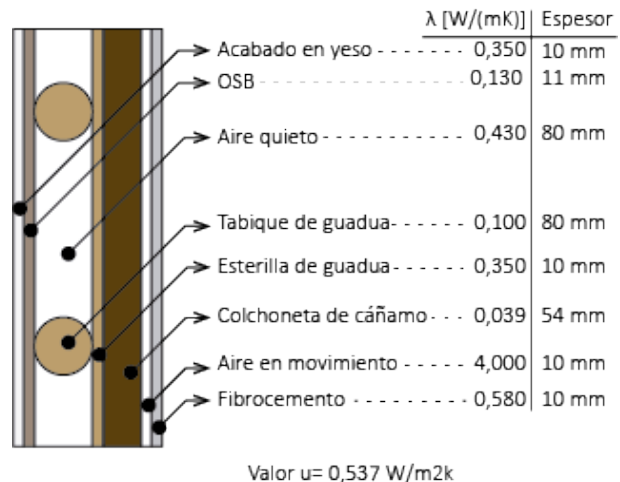
### 3. Condiciones constructivas del caso base

La vivienda fue diseñada para la interpretación del bahareque como sistema constructivo tradicional en Colombia, sin embargo, su utilización está limitada a construcciones en climas cálidos principalmente en edificaciones súper ventiladas como única estrategia bioclimática y acondicionamiento higrotérmico pasivo.



**Figura 8. Sistema constructivo de piso. Fuente: elaboración propia.**

De acuerdo a la Fig.8 se propone una placa de hormigón armado con 26mm de aislamiento térmico en Poliestireno extruido.



**Figura 9: Sistema constructivo de muro. Fuente: elaboración propia.**

El complejo de muro (ver fig. 9), en su acabado interior presenta un panel OSB sellado con un acabado de yeso, asegurando así, la hermeticidad al paso del aire; la cámara de aire ventilada, presente entre la estructura de guadua, asegura el paso del vapor evitando condensaciones superficiales e intersticiales; el acabado exterior, en lámina de fibrocemento (libre de asbesto), asegura la

impermeabilización de la envolvente; el aislamiento térmico constituido por 54mm de colchoneta de cáñamo, asegura las condiciones físicas para lograr un valor U de 0.537 W/m<sup>2</sup> K.

El cultivo de la guadua angustifolia, de gran aplicación en Colombia y en la región, constituye un cultivo sustentable, con altos índices de crecimiento y de bajas emisiones de carbono; la apuesta en el concurso y en el presente trabajo es por mejorar las condiciones de calidad del detalle constructivo manteniendo como sistema estructural de la vivienda la guadua contemplada en el título G-Estructuras de madera y Estructuras en guadua de la Norma Sismo resistente colombiana NSR10.

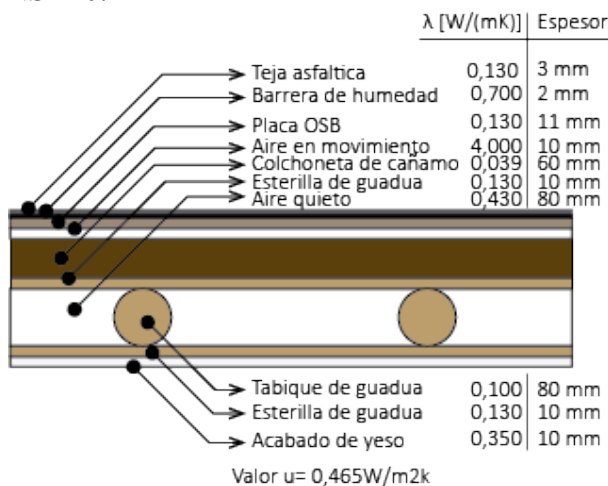


Figura 10: Sistema constructivo de techo. Fuente: elaboración propia.

Como indica la Fig. 10 el techo presenta un acabado exterior en teja asfáltica, configurando una solución constructiva, cuya estructura es la guadua; mediante el uso de 60 mm de aislante térmico en Colchoneta de cáñamo, se permite la continuidad de la envolvente, logrando un valor U de 0.465 W/m<sup>2</sup>K

La ventana propuesta (ver fig.11), es un modelo que se comercializa en el mercado colombiano, con mejoras térmicas y de hermeticidad al paso del aire, con respecto a las normalmente usadas en la industria de la construcción, su medida estandarizada tiene un

menor costo que una ventana con las mismas características fabricada a la medida del proyecto; la materialidad del marco es PVC y tiene una cámara de 6mm de aire estanco con doble capa de vidrio de 5mm

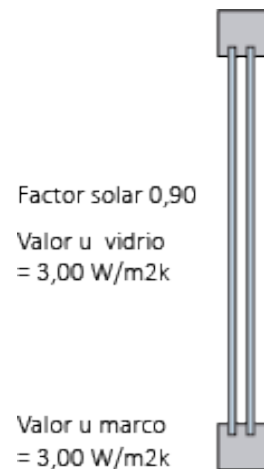


Figura 11: Sistema constructivo de ventana. Fuente: elaboración propia.

### 3.4. Parámetros de Simulación

Antes de explicar los resultados obtenidos, es necesario mostrar los parámetros de simulación utilizados en el Software PHPP (Passive House Planning Package), para poder entender a que corresponden estos y como podrían ser comparados con futuras investigaciones relacionadas.

Tabla 1: Parámetros de simulación utilizados para el caso base y el Passivhaus. Fuente: elaboración propia

Parámetros para el desarrollo de la simulación		
Parámetro	Caso base	Caso Passivhaus
Temperatura de confort	20-26 °C	
Datos de ocupación	Típicos para una vivienda	
Fuente de energía primaria	no-renovable	
Ventilación natural	por ventanas	No
Factor de reducción	0,90	0,40

de sombras		
Emisividad exterior	0,90	0,45
Absorción de la envolvente	0,90	0,40
Paso de radiación solar a través del vidrio	0,90	0,42
Puentes térmicos	Se simulan los dos casos sin tener en cuenta puentes térmicos	

De acuerdo a los requerimientos de la certificación Passivhaus, las temperaturas en verano no deben exceder los 26°C, teniendo en cuenta la condición de estabilidad anual del clima ecuatorial, se determina como rango de Confort 20-26°C, como lo indica la tabla 1. Para el caso base se considera el uso de ventilación natural por ventanas mientras que el caso Passivhaus la ventilación es mecánica. El factor de reducción de sombras para el caso base considera un sombreado del 10% de las sombras incidentes en fachada y el Caso Passivhaus un 60%. La emisividad exterior considera el porcentaje de ganancia de calor de acuerdo a la materialidad, siendo 0.9 para el caso base y 0.45 para el caso Passivhaus. El factor de absorción de la envolvente, considera para el caso base 0.9, correspondiente a colores oscuros y para el caso Passivhaus 0.45 colores claros.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Resultados obtenidos en la simulación del caso base

Se realizaron simulaciones usando el software PHPP, el cual es utilizado mediante el software Design PH que funciona como plug-in para Sketch Up, permitiendo la volumetría en 3d, los datos de la forma de la vivienda, se exportan a la hoja de cálculo utilizada para las simulaciones energéticas.

En la Tabla 2. como datos destacables se puede observar que la demanda específica de refrigeración es de 156,3 kWh/m<sup>2</sup>Año,

considerada bastante elevada con respecto a los 15 kWh/m<sup>2</sup>Año, que requiere la certificación Passivhaus; ya que el clima tiene temperaturas altas durante todo el año, genera un permanente consumo energético; además, al ser un clima húmedo, genera una demanda importante en deshumificación de 90,1 kWh/m<sup>2</sup>Año, para un total en climatización de 246,4 kWh/m<sup>2</sup>Año. estos valores no cumplen lo exigido por la certificación, además, la carga de refrigeración es 26.3 W/m<sup>2</sup>, la cual no cumple con los requerimientos de Certificación (10 W/m<sup>2</sup>). La tabla 2. muestra el mes de mayor demanda energética (febrero), menor demanda energética (noviembre) y el total de todo anual.

**Tabla 2: Demanda específica de refrigeración en el caso base, Fuente: elaboración propia mediante el uso del software PHPP**

	Febrero	Noviembre	Anual	
Grados-hora de calefacción, exterior	0,6	-0,2	-0,7	kKh
Grados-hora de calefacción, terreno	0,0	-0,4	-3,0	kKh
Pérdidas hacia el exterior	75,7	-39,6	27,2	kWh
Pérdidas hacia el terreno	1,9	-20,9	17,0	kWh
Pérdidas ventilación en verano	26,1	11,1	17,8	kWh
Total de pérdidas de calor específicas	1,5	-0,7	4,0	kWh/m <sup>2</sup>
Cargas solares norte	160,1	139,8	20,1	kWh
Cargas solares este	0,0	0,0	0,0	kWh

Cargas solares sur	212,7	274,6	25,35,0	kWh
Cargas solares oeste	0,0	0,0	0,0	kWh
Cargas solares horizontales	0,0	0,0	0,0	kWh
Cargas solares elementos opacos	275,9	280,2	31,82,6	kWh
Ganancias internas de calor (GIC)	231,7	224,2	27,28,3	kWh
Total de cargas específicas solares+internas	12,8	13,4	15,2,3	kWh/m <sup>2</sup>
Grado de aprovechamiento de pérdidas de calor	1,0	1,0	1,0	
Demanda total de refrigeración	776,7	968,3	10,72,1,5	kWh
Demanda específica de refrigeración	11,3	14,1	15,6,3	kWh/m <sup>2</sup>
Demanda específica de deshumidificación	9,0	7,7	90,1	kWh/m <sup>2</sup>
Proporción sensible	56%	65%	63%	%

#### 4.2. Estrategias y modificaciones realizadas al caso base para el cumplimiento del estándar Passivhaus

De acuerdo a la Fig. 12. se analizó la combinación de diferentes estrategias, manteniendo la complejidad de la construcción del caso base, se propone un aumento en las

dimensiones del aislamiento térmico, hasta llegar a las exigencias del caso Passivhaus.



Figura 12: Estrategias para el potencial de ahorro energético en climas tropicales cálidos Fuente: elaboración propia.

El aumento en el aislamiento térmico para llegar al cumplimiento del estándar Passivhaus fue significativo, los detalles constructivos de piso, techo y muros, siguen siendo los mismos planteados para el concurso, como se indica en la fig. 13. el poliestireno extruido aumentó a 100mm a diferencia del indicado en la Fig.8, dando un cambio importante en su transmitancia térmica.

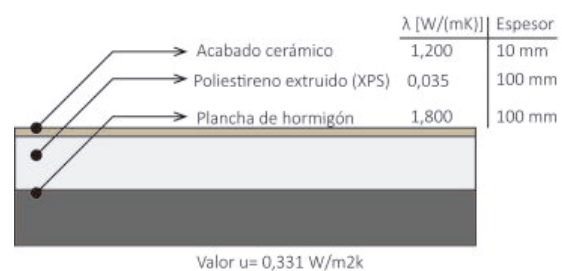
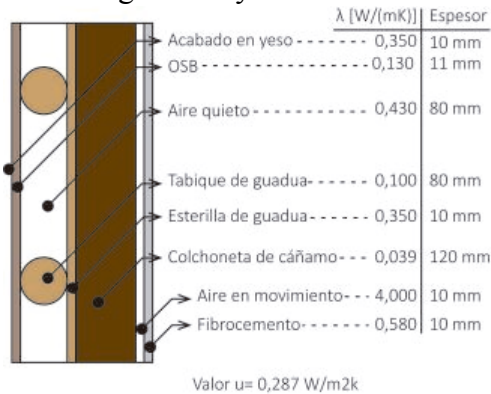


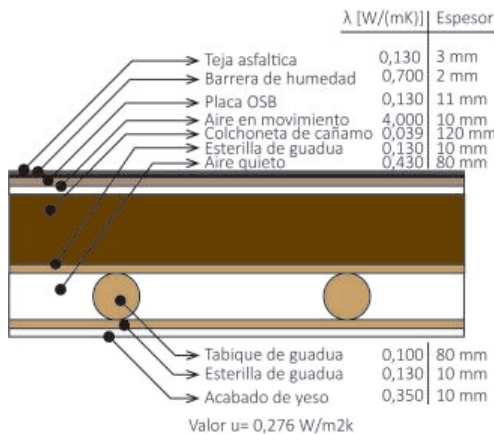
Figura 13: Sistema constructivo de piso, Caso Passivhaus Fuente: elaboración propia.

El único cambio en los detalles constructivos de muro y de techo, fue en el espesor de la colchoneta de cáñamo, usada en este caso como aislamiento térmico, se obtiene un aumento significativo en la transmitancia térmica de las soluciones constructivas, siendo para el caso base muro el valor  $u=0,537$  W/m<sup>2</sup>k y en la propuesta Passivhaus valor

$u=0,287 \text{ W/m}^2\text{k}$ , para el caso del techo en el caso base, valor  $u=0,465 \text{ W/m}^2\text{k}$  y en la propuesta Passivhaus  $u=0,276 \text{ W/m}^2\text{k}$ , como lo indican las figuras 14 y 15.



**Figura 14: Sistema constructivo de muro, Caso Passivhaus Fuente: elaboración propia.**



**Figura 15: Sistema constructivo de techo, Caso Passivhaus Fuente: elaboración propia.**

Las características de la ventana, (ver fig.16) corresponden a la de una certificada por componentes por el Passivhaus Institut, cuenta con un factor solar de los más bajos del mercado; esto debido a que se encontró un gran potencial de ahorro energético para este clima, ya que, al disminuir las ganancias solares en la parte transparente de la envolvente, genera menor índice de sobrecalentamiento.



**Figura 16: Sistema constructivo de ventana, Caso Passivhaus Fuente: elaboración propia.**

### 4.3. Resultados obtenidos en la simulación del caso Passivhaus

En la tabla 3. como datos destacables se puede observar que, la demanda específica de refrigeración es de  $47,7 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ , el cual es un dato bastante elevado, teniendo en cuenta que la vivienda en este caso cumple con los parámetros del estándar Passivhaus; esto sumado a que no es la única demanda energética para climatización teniendo para deshumidificación  $17,4 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ , para una demanda energética total de  $65,1 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ , estos valores no cumplen lo exigido por la certificación, sin embargo, la carga de refrigeración es  $9 \text{ W/m}^2$ , la cual cumple con los requerimientos de Certificación ( $10 \text{ W/m}^2$ ), pudiendo de esta manera obtener la certificación de la vivienda.

**Tabla 3: Demanda específica de refrigeración en el caso Passivhaus. Fuente: elaboración propia mediante el uso del software PHPP**

	Febrero	Noviembre	Año	
Grados-hora de calefacción, exterior	0,3	-0,7	-	kKh
Grados-hora de calefacción, terreno	-0,8	-1,4	-	kKh
Pérdidas hacia el exterior	17,1	-43,7	-	kWh
Pérdidas hacia el	-	-24,2	-	kWh

terreno	13,9		251,5
Pérdidas ventilación en verano	0,0	0,0	0,0
Total de pérdidas de calor específicas	0,0	-1,0	-10,0
Cargas solares norte	10,4	9,6	137,6
Cargas solares este	0,0	0,0	0,0
Cargas solares sur	18,8	18,9	174,8
Cargas solares oeste	0,0	0,0	0,0
Cargas solares horizontales	0,0	0,0	0,0
Cargas solares elementos opacos	45,3	42,7	486,3
Ganancias internas de calor (GIC)	137,0	146,8	178,5
Total de cargas específicas solares+internas	3,1	3,2	37,7
Grado de aprovechamiento de pérdidas de calor	1,0	1,0	1,0
Demanda total de refrigeración	208,3	285,9	327,0
Demanda específica de refrigeración	<b>3,0</b>	<b>4,2</b>	<b>47,7</b>
Demanda específica de deshumidificación	<b>1,3</b>	<b>1,4</b>	<b>17,4</b>
Proporción sensible	70%	74%	73%

#### 4.4. Resultados obtenidos en la simulación del caso Passivhaus en Panamá

De acuerdo a lo propuesto en las etapas de investigación y luego de obtener resultados favorables en la simulación efectuada para la ciudad de Barranquilla, el presente estudio propone evaluar el caso de estudio en 2 ciudades latinoamericanas con condiciones de clima cálido húmedo.

Para el caso de la simulación en la Ciudad de Panamá, como indica la Tabla 4, la demanda específica de refrigeración es de 41,0 kWh/m<sup>2</sup>a, para deshumidificación 18,8 kWh/m<sup>2</sup>a, para una demanda energética total de 59.8 kWh/m<sup>2</sup>a, estos valores no cumplen lo exigido por la certificación, sin embargo, la carga de refrigeración es 8,6 W/m<sup>2</sup>, la cual cumple con los requerimientos de Certificación (10 W/m<sup>2</sup>), pudiendo de esta manera obtener la certificación de la vivienda.

**Tabla 4: Demanda específica de refrigeración en el caso Passivhaus CIUDAD DE PANAMÁ. Fuente: elaboración propia mediante el uso del software PHPP**

	Abril	Noviembre	Año	
Grados-hora de calefacción, exterior	-0,9	0,3	-1,1	kKh
Grados-hora de calefacción, terreno	-1,0	-0,4	-9,3	kKh
Pérdidas hacia el exterior	53,9	16,7	76,4	kWh
Pérdidas hacia el terreno	16,8	-7,6	15,6	kWh
Pérdidas ventilación en verano	0,0	0,0	0,0	kWh
Total de pérdidas de calor específicas	-1,0	0,1	-3,4	kWh/m <sup>2</sup>
Cargas solares	13,	9,6	13	kWh

norte	0		7,0	
Cargas solares este	0,0	0,0	0,0	kWh
Cargas solares sur	12,0	19,0	17,9	kWh
Cargas solares oeste	0,0	0,0	0,0	kWh
Cargas solares horizontales	0,0	0,0	0,0	kWh
Cargas solares elementos opacos	41,5	42,7	48,3	kWh
Ganancias internas de calor (GIC)	14,5,9	145,9	17,75	kWh
Total de cargas específicas solares+internas	3,1	3,2	37,5	kWh/
Grado de aprovechamiento de pérdidas de calor	1,0	1,0	1,0	
Demanda total de refrigeración	28,3,1	208,1	28,10,8	kWh
Demanda específica de refrigeración	4,1	3,0	41,0	kWh/
Demanda específica de deshumidificación	1,6	1,6	18,8	kWh/
Proporción sensible	73%	66%	69%	

#### 4.5. Resultados obtenidos en la simulación del caso Passivhaus en Guayaquil

Para el caso de la simulación en Guayaquil, como indica la Tabla 5, la demanda específica de refrigeración es de 29,5 kWh/m<sup>2</sup>a, para deshumidificación 18,3 kWh/m<sup>2</sup>a, para una demanda energética total de 47,8 kWh/m<sup>2</sup>a, estos valores no cumplen lo exigido por la certificación, sin embargo, la carga de refrigeración es 8,4 W/m<sup>2</sup>, la cual cumple con

los requerimientos de Certificación (10 W/m<sup>2</sup>), pudiendo de esta manera obtener la certificación de la vivienda.

**Tabla 5: Demanda específica de refrigeración en el caso Passivhaus GUAYAQUIL. Fuente: elaboración propia mediante el uso del software PHPP**

	Marzo	Julio	Año	
Grados-hora de calefacción, exterior	-0,1	1,9	8,9	kKh
Grados-hora de calefacción, terreno	0,6	-	-	kKh
Pérdidas hacia el exterior	-7,1	11	55	kWh
Pérdidas hacia el terreno	10,6	-	-	kWh
Pérdidas ventilación en verano	0,0	0,0	0,0	kWh
Total de pérdidas de calor específicas	0,1	1,6	8,0	kWh/m <sup>2</sup>
Cargas solares norte	10,8	13,4	13,4,7	kWh
Cargas solares este	0,0	0,0	0,0	kWh
Cargas solares sur	15,1	10,9	17,9,9	kWh
Cargas solares oeste	0,0	0,0	0,0	kWh
Cargas solares horizontales	0,0	0,0	0,0	kWh
Cargas solares elementos opacos	42,3	37,4	48,6,3	kWh
Ganancias internas de calor (GIC)	148,6	14,8,6	17,49,4	kWh
Total de cargas específicas solares+internas	3,2	3,1	37,2	kWh/m <sup>2</sup>
Grado de aprovechamiento de pérdidas de calor	1,0	0,8	1,0	
Demanda total de refrigeración	213,2	11,5,8	20,21,3	kWh
Demanda específica	3,1	1,7	29,	kWh/m <sup>2</sup>

de refrigeración				5
Demanda específica de deshumidificación	1,6	1,5	18,3	kWh/m <sup>2</sup>
Proporción sensible	66%	52%	62%	%

## 5. DISCUSIÓN

Se revisan los resultados obtenidos mediante simulaciones, se comparan entre sí y con los datos encontrados dentro de la revisión bibliográfica, se plantean los hallazgos principales, las dificultades que puede tener la implementación del estándar y se presentan futuros trabajos que podrían desarrollarse a partir de este.

### 5.1. Comparación de los resultados obtenidos mediante simulaciones, entre sí.

En la tabla 6. se hace una revisión de los principales datos encontrados mediante las simulaciones desarrolladas en PHPP, para saber cuál es el funcionamiento de los dos casos y si realmente el cumplimiento del estándar Passivhaus presenta resultados que puedan ser aplicables para la industria de la construcción en estas condiciones climáticas.

La principal disminución en porcentaje de ahorro, para la aplicación del estándar Passivhaus, se presenta para la demanda de deshumidificación que pasa de 90.1 kWh/m<sup>2</sup>Año a 17.4 kWh/m<sup>2</sup>Año significando un ahorro de 80.7% con respecto al caso base

**Tabla 6: Comparación en la demanda de refrigeración y deshumidificación para el caso base y el caso Passivhaus. Fuente: elaboración propia**

Resultados de demanda energético caso base Passivhaus			
	Caso base	Passivhaus	Unidad
Refrigeración	156,3	47,7	kWh/m <sup>2</sup> a
Deshumidificación	90,1	17,4	kWh/m <sup>2</sup> a
Total	246,4	65,1	kWh/m <sup>2</sup> a

Se pueden ver unos ahorros bastante

grandes y significativos en la demanda energética de la vivienda, con una disminución de 108,6 kWh/m<sup>2</sup>Año en refrigeración con un porcentaje de ahorro del 69,5%, para un total sumando la demanda de refrigeración y deshumidificación de 181,3 kWh/m<sup>2</sup>, logrando un porcentaje total de disminución de 73,6%, lo que puede traducirse en una mayor posibilidad para los habitantes de tener la vivienda en condiciones higrotérmicas confortables, este valor es considerado de gran alcance ya que supera las expectativas de ahorro energético de la normativa vigente nacional colombiana.

### 5.2. Comparación de los resultados obtenidos mediante simulaciones energéticas en las diferentes ciudades.

Como se indica en la tabla 7, Guayaquil tiene la menor demanda energética, así mismo tiene la menor carga de refrigeración, con una demanda total para refrigeración de 47,8 kWh/m<sup>2</sup>Año y una carga de refrigeración de 8,4 w/m<sup>2</sup>, presenta los valores más favorables para la aplicación del estándar Passivhaus, pese a tener la mayor demanda por deshumidificación. La ciudad de Barranquilla presenta la mayor demanda total con 65.1 kWh/m<sup>2</sup>Año y Ciudad de Panamá se encuentra en un valor medio.

**Tabla 7: Comparación de los resultados obtenidos para las diferentes ciudades simuladas en demanda energética kWh/m<sup>2</sup>Año Fuente: elaboración propia**

	Barranquilla	C. Panamá	Guayaquil
Refrigeración	47,7	41,0	29,3
Deshumidificación	17,4	18,8	18,3
Total	65,1	59,8	47,8
Carga R	9	8,6	8,4

De acuerdo a la comparación con estudios realizados para evidenciar el porcentaje de ahorro energético del estándar

Passivhaus, se considera que es cercano al 77% de ahorro en la ciudad de Singapur [10], el presente caso de estudio logra un ahorro de 73.6% de demanda energética total comuna carga de refrigeración de 9 w/m<sup>2</sup>, en comparación con los 10.7 w/m<sup>2</sup> del artículo de referencia.

### 5.3. Futuros trabajos

Para futuros trabajos se recomienda abordar la investigación con diferentes tipologías de vivienda, para poder compararlas, las mismas que pueden estar adaptadas a la realidad constructiva de cada país.

El significativo ahorro energético encontrado pone en evidencia la posibilidad de analizar el potencial que tienen las edificaciones de consumo energético casi nulo NZEB por sus siglas en inglés y de consumo energético nulo ZEB, adicionalmente la evaluación de la pertinencia y factibilidad del uso de energías renovables para tener mayor autonomía y menor consumo de energías convencionales.

La aplicación del estándar Passivhaus además del aporte en la reducción de la demanda energética, presenta importantes beneficios en las condiciones de confort interior, frente a ello se considera de gran importancia la evaluación del impacto en la salud de los ocupantes, extendiéndose a otras tipologías edificatorias como edificios de oficina y hospitalarios.

La aplicación de conceptos de alta eficiencia, puede extenderse a las diferentes demandas energéticas de la vivienda (agua caliente sanitaria, equipos y electrodomésticos), evaluando su impacto en la reducción de las emisiones de gases efecto invernadero en las edificaciones.

## 6. CONCLUSIONES

Siendo Passivhaus un estándar de alto confort térmico, con bajo consumo energético y de acuerdo con los resultados encontrados en el presente trabajo se considera que es una solución apropiada para implementar en

climas tropicales cálidos húmedos, representando no solo una disminución del consumo energético de los hogares y una forma accesible de mantener el confort higrotérmico al interior, sino también un medio para tener contribuciones con el medio ambiente, en donde los aportes podrían ser significativos, con la masificación del estándar de la manera en que se ha difundido en Europa.

El presente trabajo como una primera aproximación del estándar Passivhaus en Colombia considera la materialidad de la Guadua angustifolia, siendo un material con baja huella de carbono, su aplicación como sistema estructural permitió para el presente trabajo considerar el mejoramiento térmico de un material que es usado comúnmente en edificaciones efímeras y con gran permeabilidad al aire. El ahorro energético encontrado para las ciudades de Barranquilla, Panamá y Guayaquil estimado en 73.5%, 75.7% y 80.6% respectivamente, se considera de alta replicabilidad en muchas ciudades latinoamericanas, aportando al compromiso en la reducción de la demanda energética bajo el principal consumo asociado a la refrigeración de espacios interiores

Pese al incipiente avance en la regulación sobre eficiencia energética en las edificaciones, se considera pertinente la aplicación del estándar Passivhaus, permitiendo importantes avances en la disminución de la energía demandada por las edificaciones y la posible aplicación de equipos eficientes para refrigeración que permitan incluso avanzar hacia las edificaciones de mínimo impacto ambiental. El principal reto al que se enfrenta la realidad constructiva, requiere importantes esfuerzos por desarrollar innovaciones tecnológicas para la industria de la construcción, proporcionar nuevos detalles constructivos que actualmente no se consideran dentro del mercado y la adaptación de los mismos desde países en donde se construye normalmente con mayor calidad, para que su adaptación se realice con materiales del sector sin generar grandes

impactos por extracción, fabricación y transporte.

El desarrollo de estudios sobre eficiencia energética en la edificación en diferentes zonas climáticas dentro del trópico, son de suma importancia, para cuantificar el potencial de ahorro energético, y con ello la disminución de gases efecto invernadero y representan un primer paso para su futura implementación.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Mihai, V. Tanasiev, C. Dinca, A. Badea, R. Vidu, "Passive house analysis in terms of energy performance", *Energy and Buildings*, Volume 144, 2017, Pages 74-86, ISSN 0378-7788
- [2] M. Khalfan, S. Sharples, "Thermal comfort analysis for the first passivhaus project in Qatar", *Proceedings of SBE16 Dubai*, 17-19 January, 2016.
- [3] H. Saldaña, J.M. Gómez, S.P. Arredondo, J.L. Almaral, M.C. Gómez, G. Rosell. "The passivhaus standard in the mediterranean climate: evaluation, comparison and profitability" *Journal of Green Building* 10(4):55-72, October 2015. DOI: 10.3992/jgb.10.4.55.
- [4] A. Consoli, V. Costanzo, G. Evola, L. Marletta, "Refurbishing an Existing Apartment Block in Mediterranean Climate: Towards the Passivhaus Standard", *Energy Procedia*, Volume 111, 2017, Pages 397-406, ISSN 1876-6102.
- [5] K.J. Chua, S.K. Chou, W.M. Yang, J. Yan, "Achieving better energy-efficient air conditioning – A review of technologies and strategies", *Applied Energy*, Volume 104, 2013, Pages 87-104, ISSN 0306-2619. available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.037>.
- [6] T.S. Ge, Y.J. Dai, R.Z. Wang, Y. Li, "Performance of two-stage rotary desiccant cooling system with different regeneration temperatures" *Energy*, 80 (2015), pp. 1-11. Available: [10.1016/j.energy.2014.12.010](https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.010)
- [7] Spencer M. Dutton, William J. Fisk, "Energy and indoor air quality implications of alternative minimum ventilation rates in California offices". *Building and Environment*, Volume 82, 2014, Pages 121-127, ISSN 0360-1323. Available: (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132314002613>)
- [8] Z. Duan, X. Zhao, J. Li, "Design, fabrication and performance evaluation of a compact regenerative evaporative cooler: Towards low energy cooling for Buildings", *Energy*, Volume 140, Part 1. 2017, Pages 506-519, ISSN 0360-5442 Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.110>.
- [9] R. Bruno, N. Arcuri, C. Carpino, "The Passive House in Mediterranean Area: Parametric Analysis and Dynamic Simulation of the Thermal Behaviour of an Innovative Prototype" *Energy Procedia*, Volume 82, 2015, Pages 533-539, ISSN 1876-6102, Available: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.866>. [Accessed June 18, 2019].
- [10] J. Schnieders, W. Feist, L. Rongenc, "Passive Houses for different climate zones", *Energy and Buildings*, Volume 105, 2015, Pages 71-87, ISSN 0378-7788, Available: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.032>. [Accessed June 18, 2019].